

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

## **Vysokotlaké trysky pro čištění výrobků**

High Pressure Nozzles for Products Cleaning

Student:

Bc. Petr Holíš

Vedoucí práce:

Ing. Lukáš Dvořák, Ph.D.

Ostrava 2019

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Holíš**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **2302T043 Hydraulika a pneumatika**  
Téma: **Vysokotlaké trysky pro čištění výrobků  
High Pressure Nozzles for Products Cleaning**

Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši k problematice čištění a sušení výrobků pomocí vysokotlakých trysek a nožů.
2. Popište možnosti dynamického čištění - rotační trysky, pulzní proud.
3. Experimentálně ověřte a porovnejte oba typy dynamického čištění.
4. Navrhněte alternativní řešení realizace pulzního proudu pro ošukování.

Seznam doporučené odborné literatury:


KOLEKTIV AUTORŮ. *SMC Training – Silačový vzduch a jeho využití*. Brno: SMC Industrial Automation CZ s.r.o. 2. vydání. 344 s.  
BEATER, P. *Pneumatic drives: system design, modelling and control*. Berlin: Springer, 2007. 323 p. ISBN 978-3-540-69470-0.  
KOPÁČEK, J. *Pneumatické mechanismy díl 1. – Pneumatické prvky a systémy*. Ostrava: VŠB-TUO, 1996. 267 s. ISBN 80-7078-306-0.  
MURRENHOFF, H., REINERTZ, O. *Fundamentals of fluid power: Part 2, Pneumatics*. Aachen: Shaker Verlag, 2014. 333 p. ISBN 978-3-8440-3213-0.  
Katalogy a podklady výrobců pneumatických prvků.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Dvořák, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

  
doc. Dr. Ing. Lumír Hrušík  
vedoucí katedry

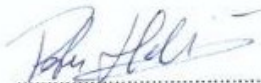


  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřisežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.


V Ostravě .....20.5.2019.....

  
.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského práva,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 20.5.2019



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Petr Holíš

Adresa trvalého pobytu autora práce: Dělnická 224/16, 742 35 Odry

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HOLIŠ, P. *Vysokotlaké trysky pro čištění výrobků: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2019, 57 s. Vedoucí práce: Dvořák, L.

Diplomová práce se zabývá vysokotlakými tryskami pro čištění výrobků. V úvodní části své práce jsem vytypoval a popsal vysokotlaké trysky a vzduchové nože, které se v průmyslu používají k čištění výrobků, popsal jsem jejich vlastnosti a oblast použití. V další části jsem se zaměřil na pulzní ventily a rotační trysky, kde jsem rovněž popsal jejich vlastnosti. Oba typy vytváří dynamický efekt, který může být někdy účinnější než souvislý proud. Další část práce byla praktická, experimentálně jsem porovnával různé typy ofuků a porovnával jejich vlastnosti v závislosti na tlaku, průtoku apod. Experimenty jsem vyhodnocoval číselně, graficky, a také vizuálně. V poslední části práce jsem navrhl alternativní řešení pulzního proudu.

## ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

HOLIŠ, P. *High Pressure Nozzles for Products Cleaning: diploma Thesis*. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2019, 57 p. Thesis head: Dvořák, L.

Diploma thesis deals with high pressure nozzles for products cleaning. In the first part I have focused and described high pressure nozzles and air knives which are used in industry for products cleaning. I have described their properties and area of using. Second part of diploma thesis deals with pulse valves and rotating nozzles and I have also described their properties. Both types create dynamic effect which can be sometimes more effective than continuous flow. Next part was practical, I have experimentally compared different types of nozzles, their properties depending on pressure, air flow and so on. I have evaluated experiments numerically, graphically and also visually. In the last part of my diploma thesis I have designed alternative solutions of pulsing flow.

## Obsah

|  |    |
|--|----|
| 1. Úvod.....   | 3  |
| 2. Nízkotlaké trysky a nože .....                              | 4  |
| 3. Vysokotlaké vzduchové nože a trysky .....                   | 5  |
| 3.1 Vysokotlaké trysky.....                                    | 5  |
| 3.2 Vzduchové nože .....                                       | 6  |
| 3.3 Aplikace vzduchových nožů .....                            | 10 |
| 4. Pulzní ventily a rotační trysky.....                        | 12 |
| 4.1 Jednotka úspory vzduchu – Parker.....                      | 12 |
| 4.2 Pulzní ventil firmy Parker .....                           | 14 |
| 4.3 Pulzní ventil firmy Festo .....                            | 15 |
| 4.4 Pulzní vzduchová pistole a pulzní ventil – KOGANEI.....    | 17 |
| 4.5 Oscilační ventil .....                                     | 18 |
| 4.6 Rotační tryska Pata-gun .....                              | 19 |
| 4.7 Rázový rotační vzduchový nůž .....                         | 22 |
| 4.8 Rotační tryska RT .....                                    | 23 |
| 4.9 Další typy rotačních trysek.....                           | 24 |
| 4.9.1 Odsávací hlavice s rotačními tryskami.....               | 25 |
| 5. Porovnání dynamických ofuků .....                           | 26 |
| 5.1 Konstrukce pulzního ventilu a pulzní pistole Koganei ..... | 26 |
| 5.2 Realizace a postup měření č. 1 .....                       | 29 |
| 5.2.1 Použité prvky při měření.....                            | 32 |
| 5.2.3 Vyhodnocení měření č. 1 .....                            | 34 |
| 5.2.4 Měření pulzního ventilu Koganei.....                     | 34 |
| 5.2.5 Měření pulzní pistole Koganei .....                      | 39 |
| 5.3 Realizace a postup měření č. 2.....                        | 42 |
| 5.3.1 Výsledky měření č. 2.....                                | 43 |
| 5.4 Realizace a postup měření č. 3 a č. 4 .....                | 45 |
| 5.4.1 Výsledky měření č. 3.....                                | 47 |
| 5.4.2 Výsledky měření č. 4.....                                | 48 |
| 5.5 Realizace a postup měření č. 5.....                        | 50 |
| 5.5.1 Výsledky měření č. 5.....                                | 51 |
| 5.6 Realizace a postup měření č. 6.....                        | 52 |
| 6. Alternativní řešení pulzního ventilu.....                   | 54 |
| 7. Závěr .....   | 58 |
| 8. Použité zdroje.....   | 60 |

## Seznam použitých značek a symbolů

|   |           |   |
|---|-----------|---|
| D | průměr    | [mm]  |
| I | proud     | [mA, A]   |
| L | délka     | [ $\mu\text{m}$ , mm, m]                                |
| N | náklady   | [Kč]  |
| Q | průtok    | [ $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , $\text{Nl/min}$ ] |
| T | perioda   | [s]   |
| U | napětí    | [V]   |
| V | objem     | [ $\text{dm}^3$ , $\text{Nl}$ , $\text{Nm}^3$ ]         |
| f | frekvence | [Hz]  |
| p | tlak      | [Pa, MPa]   |
| t | čas       | [s]   |

# 1. Úvod

Ve své diplomové práci se budu zabývat převážně pulzními ventily a rotačními tryskami, jejich vlastnostmi, konstrukcí a použitím. Budu se snažit popsat výhody pulzních ventilů a rotačních trysek oproti běžným ventilům a tryskám. Pulzní ventily by se daly taky nazvat jako dynamické, jelikož pulzací vytváří dynamický ráz. Rozeberu také vzduchové nože a trysky, jelikož jejich zastoupení je poměrně velké a rozhodně mají taky spoustu výhod ve srovnání s běžnými typy pro ofukování. Jednou z výhod pulzních ventilů je určitě spotřeba vzduchu, což může vést ke značné úspoře. Další výhodou je dynamický ráz, který je kolikrát účinnější pro různé aplikace než běžný souvislý proud vzduchu.

Stlačený vzduch je nepostradatelnou součástí ve všech odvětvích průmyslu. Někde může být používán jako pohon k automatizačním linkám, někde může být využíván k pohánění lisovacích strojů nebo i výrobních linek. Na stlačený vzduch funguje také spousta nářadí, jako třeba pneumatické vrtačky, ráčny, brusky, utahováky, sponkovačky apod. Vzduch může být také využíván k dopravě či přemístění materiálu jako jsou granuláty, prášky a další [1]. Nicméně jedna ze základních činností, ke kterým stlačený vzduch slouží, je ofukování, sušení, čištění, chlazení atd. Řekl bych, že spousta lidí, kteří stlačený vzduch k práci používají, a možná spíš i lidi, kteří za stlačený vzduch platí, nemají moc ponětí o tom, jak je stlačený vzduch drahý, a že by se jej měli snažit využívat co nejefektivněji a snažit se dostupnými prostředky jeho spotřebu snížit. Samozřejmě existují prvky jako škrticí ventily nebo redukční ventily, jimiž je možné regulovat spotřebu vzduchu. Existuje také spousta různých trysek, nožů nebo právě pulzních ventilů, které dokáží značně snížit spotřebu stlačeného vzduchu. Ve spojení se škrticím ventilem nebo redukčním ventilem dosáhneme samozřejmě vyšší úspory, a hlavně máme větší možnost regulovat průtok vzduchu.

V rámci této práce se pokusím popsat a ukázat použití takovýchto pulzních ventilů nebo trysek na praktickém příkladě, aby byl co nejlépe vidět efekt pulzních ventilů. Porovnáám použití pulzního ventilu a některého ze vzduchových nožů nebo trysek. Ventilů, které fungují na princip pulzace, je několik, já jsem pro svou práci vybral několik typů, které mi byly dostupné.



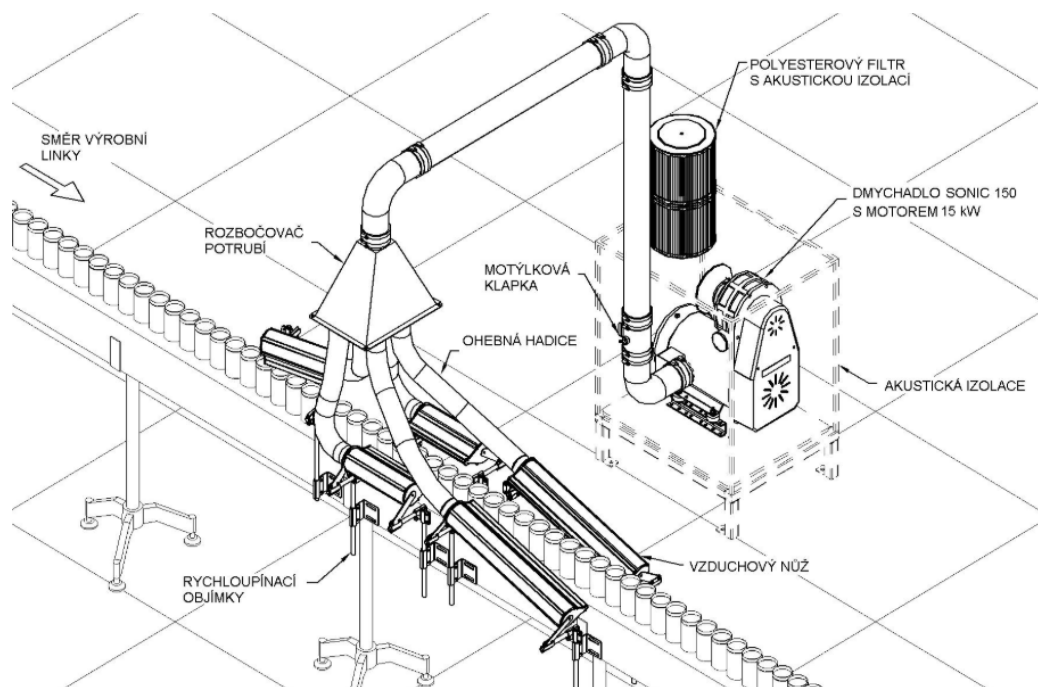
## 2. Nízkotlaké trysky a nože

Ve své diplomové práci se budu zabývat vysokotlakými vzduchovými noži a tryskami. Nicméně na úvod je třeba zmínit, že vzduchové nože a trysky se dělí na nízkotlaké a vysokotlaké. Zásadní rozdíl je v tom, že u vysokotlakých nožů se vzduch bere z rozvodu, kdežto u nízkotlakých nožů se používá dmyhadlo, které stlačuje vzduch. S tím je spojen i rozdíl tlaků. U vysokotlakých rozvodů se pohybuje tlak okolo 0,8 MPa až 1 MPa a u nízkotlakého rozvodu je tlak zhruba do 0,1 MPa [2].

Nízkotlaký systém se používá převážně tam, kde se fouká na něco neustále a není třeba vyšší účinnosti. Například když po lince jedou kontinuálně pet láhve, které je třeba vysušit. Výhodou nízkotlakého systému je práce při nízkém tlaku, z čehož plyne i poměrně nízká spotřeba vzduchu, a tudíž náklady na provoz jsou rovněž nízké. Další výhodou je nasměrování proudu vzduchu nože, jelikož nůž je vytvarovaný plech, takže je možnost jej vyrobit přesně tak, jak potřebujeme. Velkou nevýhodou je pořizovací cena nízkotlakého systému, protože je potřeba pořídit zdroj – dmyhadlo a kompletní rozvod. Další nevýhodou je to, že nízkotlaký systém se nedá použít tam, kde chceme přerušovat proudění vzduchu a tím snížit spotřebu stlačeného vzduchu. Nějakou chvíli totiž trvá, než se dmyhadlo rozjede. Kdybychom tedy chtěli něco ofouknout v krátké době, třeba v rozmezí dvou sekund, nebyl by nízkotlaký systém tou správnou volbou, protože než by se dmyhadlo zapnulo a začal by proudit vzduch z nože, byla by většina času ofukování pryč. Naopak vysokotlaký systém, například vzduchový nůž, je schopen okamžitě začít foukat, což je výhoda oproti nízkotlakému systému. Dalo by se tedy říct, že nízkotlaký systém může mít oproti vysokotlakému výhodu tam, kde potřebujeme na něco foukat neustále a není třeba vysokého tlaku a účinnosti. Nicméně větší zastoupení v praxi mají vysokotlaké vzduchové nože.

Na obrázku č. 1 níže je příklad aplikace, kde jsou použity nízkotlaké vzduchové nože. Jedná se o aplikaci, kde nízkotlaké vzduchové nože suší pet láhve, které jedou po lince. Na obrázku je vidět celý systém, včetně dmyhadla. Dmyhadlo s motorem se umísťuje do izolované skříně, aby se eliminoval hluk.

Dále se už však nebudu zabývat nízkotlakými rozvody, ale jen vysokotlakými.



Obr. č. 1 – Nízkotlaký vzduchový nůž [2]

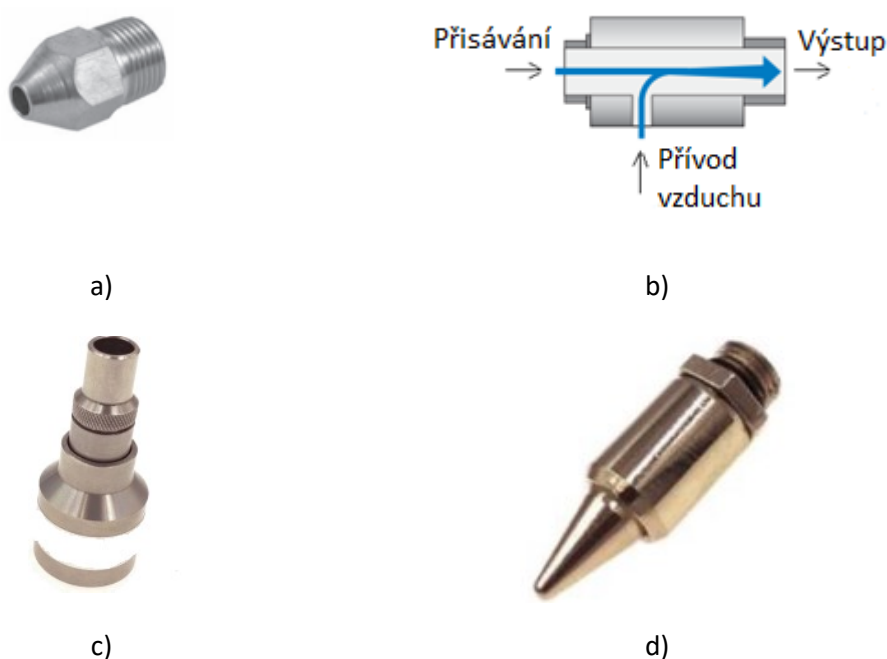
### 3. Vysokotlaké vzduchové nože a trysky

#### 3.1 Vysokotlaké trysky

Existuje spousta druhů trysek, které se používají buďto v kombinaci s ofukovací pistolí, anebo samostatně pro různé aplikace. Používají se v nejrůznějších oblastech k čištění, ofukování, chlazení anebo k zesílení výstupního proudu vzduchu, což rovněž souvisí s úsporou, jelikož není třeba přivádět velké množství vzduchu. Další důvod, proč se trysky používají, je snížení hladiny hluku, protože když máme například linku, kde je několik přívodů vzduchu, které neustále foukají, pak může být hlasitost poměrně vysoká. Použití trysek obvykle závisí na tom, k jaké aplikaci mají být určeny.

Co se týče základních typů trysek, ty se většinou liší provedením výstupu. Toto provedení může být například jako dlouhá tryska, pro špatně dostupná místa, vícekanálová tryska nebo standardní tryska. Existují trysky, které svým tvarem a provedením mají větší výkonnost. Například Venturiho tryska, která funguje tak, že do trysky je na vstup, který je obvykle z boční strany, přiveden stlačený vzduch o určitém průtoku a z jedné strany si tryska přisává okolní vzduch, který je pak na výstupu mnohem větší a silnější [3]. Tato tryska je na obrázku č. 2b). Tryska může případně fungovat i jako odsávač. Výhodou této trysky je to, že tryska nepotřebuje údržbu, jelikož v trysce nejsou žádné pohyblivé části.

Další výhodou je úspora vzduchu, které lze dosáhnout, jelikož si tryska přisává velké množství okolního vzduchu. Dalším podobným typem je Coanda tryska, jejíž tvar je kuželovitý a funguje tak, že vzduch je z trysky vyfukován mezikružím. Tím, že tryska má tvar kužele, tak se tento vzduch jakoby sveze po kuželi, čímž na sebe taky naváže okolní vzduch a vytvoří souvislý bodový proud vzduchu [30]. Zesilovací tryska je typ trysky, která funguje na principu Venturiho efektu s tím rozdílem, že je zde možnost regulovat proud vzduchu přímo na trysce [30]. Na obrázku č. 2 jsou typy trysek, které jsem vybral pro ukázkou a popsal výše.

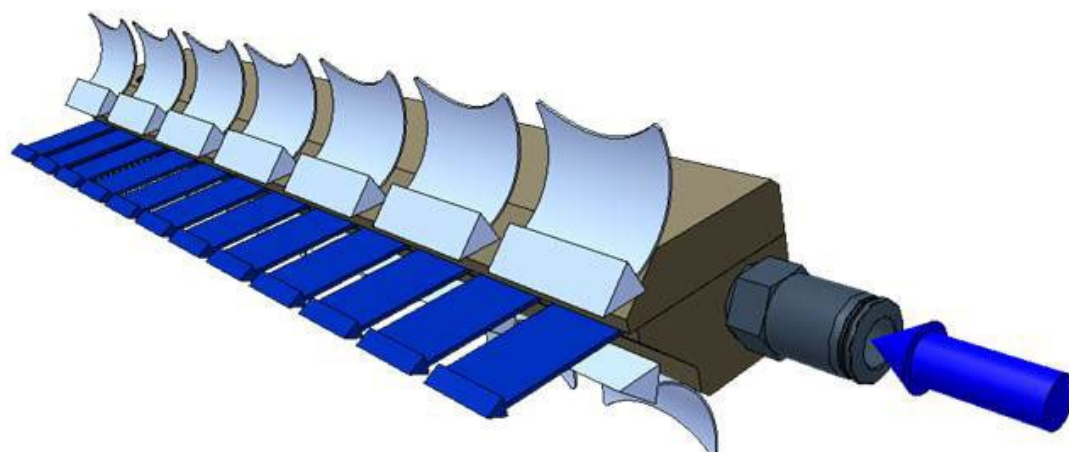


Obr. č. 2 – a) Obyč. tr., b) Řez obyč. tr. c) Zesilovací tr. d) Coanda tr. [3]

### 3.2 Vzduchové nože

Vysokotlaké vzduchové nože jsou zvláštním typem ofuku, na jejichž vývoji pracovala i česká firma MOS technik, z jejichž materiálů jsem čerpal. Vysokotlaké vzduchové nože se od ostatních ofukovacích prvků liší především svou konstrukcí, která se obvykle skládá ze dvou částí, mezi nimiž je umístěna plechová planžeta o velmi malé tloušťce, která může být buď 0,05 mm nebo 0,08 mm, případně se planžety mohou skládat na sebe. A právě těmito planžetami se dá regulovat průtok a síla vzduchu. Díky této konstrukci vyvíjí nůž velmi tenký, souvislý a silný proud vzduchu na výstupu. Vzduchové nože, podobně jako

některé již zmíněné trysky, mají tu schopnost, že vlivem svého tvaru jsou schopny při vyfukování na sebe navázat okolní vzduch, čímž produkují větší množství vzduchu na výstupu [4]. To je opět samozřejmě úzce spojeno se spotřebou vzduchu, jelikož není třeba do nože přivádět tak velké množství vzduchu. Na obrázku č. 3 je princip přímého vzduchového nože, kde je tmavě modrou barvou zobrazen stlačený vzduch, který je přiveden a světle modrou barvou okolní vzduch, který je přisáván.

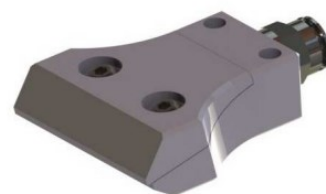


Obr. č. 3 – Princip přímého vzduchového nože [4]

Množství přivedeného vzduchu pochopitelně závisí na tom, pro jakou aplikaci je nůž použit. Jestliže je třeba jen odfouknout nějaké nečistoty jako je prach, pak není třeba velké množství vzduchu. Ale jestliže třeba budeme chtít odfouknout (očistit) materiál od vody nebo viskóznější kapaliny, pak bude potřeba větší množství vzduchu. Je několik tvarů těchto vzduchových nožů, z nichž každý je vhodný pro jinou aplikaci. Principiálně a konstrukcí jsou všechny stejné, liší se pouze tvarem. Dalším bodem, kterým se nože liší, je materiál. Materiál může být buď slitina hliníku, nebo nerez, která je ovšem dražší. Ve výjimečných případech může být materiálem plast, který se používá například v prostředích, která nesmí být kontaminována kovem [4]. Na obrázku č. 4 jsou některé typy vzduchových nožů.



a)



b)



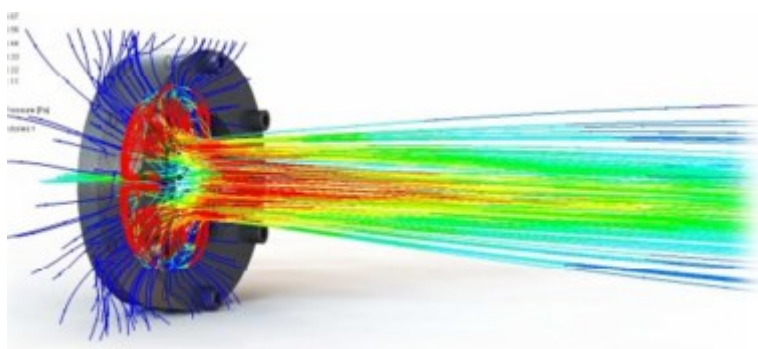
c)



d)

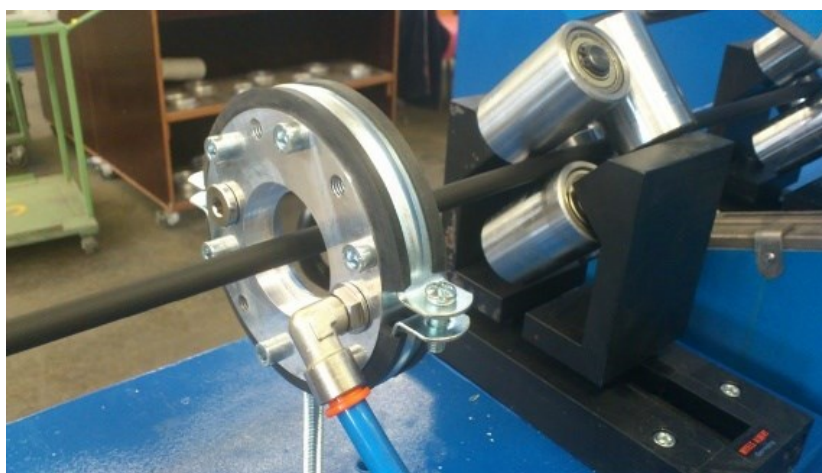
Obr. č. 4 – Vzduchové nože a) přímý nůž, b) dýza, c) nůž typu „C“, d) nůž typu „D“ [5]

Poměrně často používaným nožem je kruhový nůž. Ten je velmi často používán k chlazení nebo čištění po extruzi. Kruhový nůž vytváří jakoby vzduchový rukáv, a proto je důležité, aby pro správnou a největší účinnost byl nůž co nejblíže k danému materiálu [6]. Na obrázku č. 5 je simulace proudění vzduchu u kruhového nože.



Obr. č. 5 – Simulace proudění kruhového nože [6]

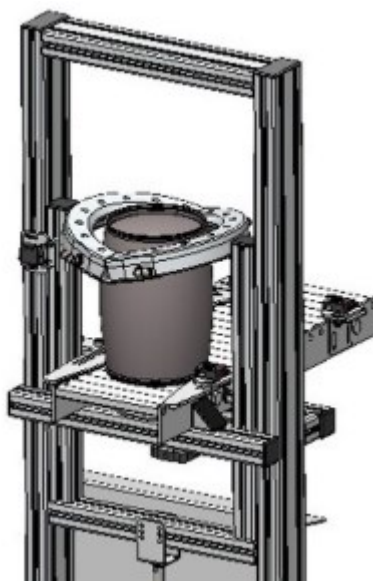
Firma, která vyrábí průmyslové a hydraulické hadice, používá kruhový nůž k čištění hadic od emulze, do nichž jsou hadice namáčeny. Pro případ, kdy se jedná o dlouhé délky hadic a není tedy možné provléct hadici skrz nůž, používá se dvoudílný kruhový nůž. Dalším příkladem jsou těsnicí profily, které jsou rovněž namáčeny do emulze. Nicméně tvar těchto profilů je daleko složitější než hadice, která má kruhový tvar. V profilu jsou různé záhyby a běžný kruhový nůž sám nestačí. Kruhový nůž je zde použit v kombinaci s malou plochou tryskou nebo vysokovýkonnou tryskou. Na prvním stupni je kruhový nůž, který zbaví těsnicí profil velkého množství emulze a plochá nebo vysokovýkonná tryska, která je instalována za kruhovým nožem, pak vysuší hůře dostupná místa od emulze.



Obr. č. 6 – Kruhový nůž sušící profil [7]

Jak už bylo řečeno, tak dvoudílné kruhové nože se používají například u hadic nebo profilů, jejichž délky jsou příliš dlouhé a není možné je provléct jednodílným kruhovým nožem. Dvoudílné nože však mají samozřejmě i další využití.

Pivovar, který vyrábí pětilitrové soudky piva, využívá dvoudílný kruhový nůž k sušení soudků po tom, co jsou umyty. Poté, co se soudek naplní pivem, tak je zašpiněný od piva a je třeba jej umýt. Avšak i po umytí dochází k tomu, že na soudku zůstává trochu piva, a když jsou pak uskladněny, tak pivo na nich usychá a po nějakém čase začne zapáchat a někdy i plesnivět. Z toho důvodu je třeba je pořádně vysušit, a právě k tomu je použit dvoudílný kruhový nůž. Ještě je zde navíc použita rázová rotační tryska pata-gun, která vyfukuje zbytky piva z plnicího ventilu, který má různé záhyby a běžný ofuk by nestačil. Na obrázku č. 7 je konstrukční model ofuku soudku.



Obr. č. 7 – Model konstrukce ofuku soudku [8]

### 3.3 Aplikace vzduchových nožů

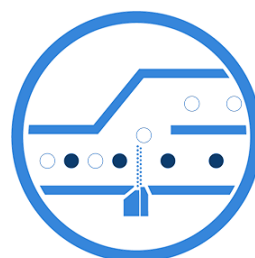
Na dalším obrázku jsou vybrány různé aplikace, ke kterým se dají vzduchové nože použít. Aplikací existuje samozřejmě více a pořád a pořád se objevují další, ke kterým je možné vzduchové nože použít.



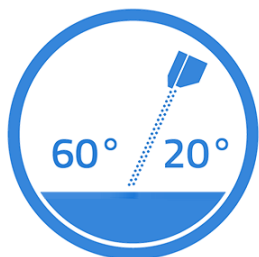
Vysoušení a odstranění  
vrstev kapalin na povrchu  
výrobků



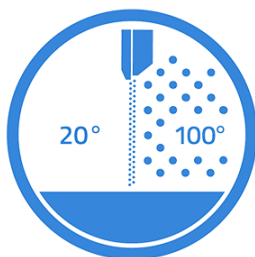
Odfouknutí prachu  
a nečistot



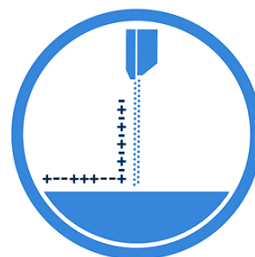
Přepravení, přidržení,  
třízení materiálů  
vzduchem



Ochlazení nebo  
zahřátí materiálů



Vzduchová clona,  
tepelná bariéra



Neutralizace  
statických nábojů

Obr. č. 8 – Průmyslové využití vzduchových nožů [9]

Výše na obrázku č. 8 jsou základní aplikace použití vzduchových nožů. Mohou být použity pro čištění – je-li materiál například po řezání nebo frézování, pak je třeba jej zbavit třísek a pro tuto aplikaci se vzduchové nože velmi často používají. Dá se totiž docílit velmi silného proudu na výstupu, který odstraní i kovové třísky. Aplikace sušení – k téhle aplikaci se poměrně často používají kruhové nože, které vysušují extrudovaný materiál. Například při výrobě hadic, které jsou po extruzi namáčeny do nějaké emulze, musí být poté vysušeny a k tomu slouží právě kruhový nůž. Další aplikace může být třídění materiálu – pomocí správně nastaveného výstupního proudu je zesilovací tryska schopna rozpoznat, zda je nádobka prázdná nebo plná určitého materiálu. Rozdíl v hmotnostech je třeba jen 4 g. Ochlazování – i v této aplikaci mají vzduchové nože velký význam. Například v jedné nejmenované firmě, kde vyrábějí litá kola, řešili ochlazení kol tak, že měli postavenou dráhu po hale, kudy kola jezdila a během cesty se postupně ochlazovala. To samozřejmě prodlužovalo výrobní proces, a proto se k optimalizaci použily vzduchové nože. Z přímých nožů se vytvořila vzduchová brána, skrz níž kola po odlití projela a ochladila je, což urychlilo proces. Vzduchové nože se používají taky v kombinaci s antistatickými tyčemi, které zbavují výrobky statické elektřiny. Výhoda této kombinace je v tom, že antistatická tyč vytváří kladné a záporné ionty a vzduchový nůž je roznese na celý výrobek. Praktickým příkladem je flockování. Flockování je technologie, při níž je na daný podklad, na kterém je nanášeno lepidlo, elektrostaticky nanášena textilní stříž. V elektrostatickém poli se vlákna stříže orientují k flockovanému předmětu a nanášením vznikne sametový povrch [10]. Tato technologie se používá například při výrobě palubních desek do automobilů. Po nanesení zůstávají na výrobku částičky stříže, které k povrchu nepřilnou a ty je třeba odstranit, k čemuž se používá vzduchový nůž v kombinaci s antistatickou tyčí. Tyč částičky buďto nabije nebo vybije čili dojde k jejich odpojení od výrobku, a vzduchový nůž je odfoukne. V neposlední řadě se nůž dá použít jako tepelná bariéra, s čímž se setkáváme běžně třeba v obchodech, kde u vstupu na nás fouká vzduch. Tam má za nůž za úkol oddělit venkovní teplotu od vnitřní, aby se častým otevíráním dveří nepouštěla zima dovnitř a teplo ven. Dalším příkladem je firma, kde se dělají kované výrobky a zaměstnanci chodí nad pecemi. V této oblasti je pochopitelně vysoká teplota, a tak zde byl instalován velký kruhový nůž, který slouží jako „sprcha“. Zaměstnanci přijdou pod nůž, zmáčknou tlačítko a jsou ochlazení vzduchem.

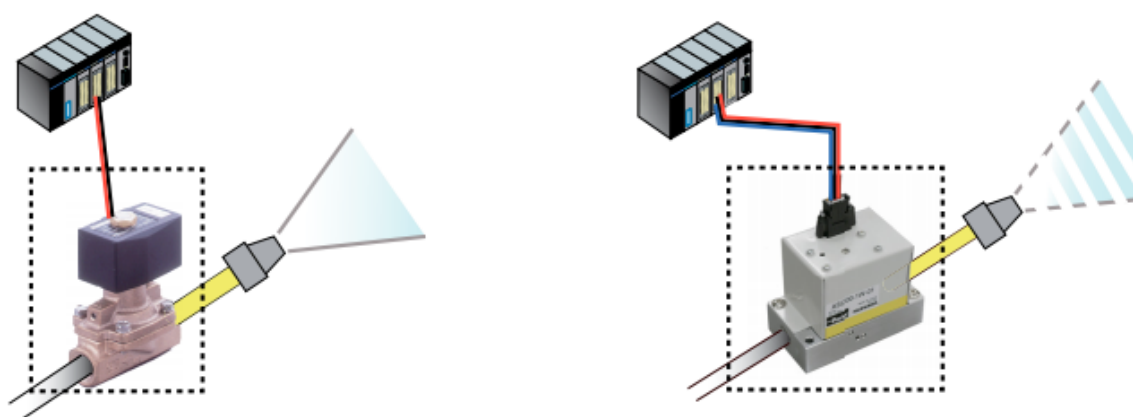


## 4. Pulzní ventily a rotační trysky

Pulzní ventily všeobecně pracují na principu přerušování signálu, což je účinnější v případě, že potřebujeme dynamický ráz při ofukování. K přerušování signálu dochází pomocí přerušení elektrického proudu, nebo může docházet k přerušení pomocí pneumatického ovládní. Další možnost, jak dosáhnout přerušovaného (pulzního) výstupu, je rotační efekt. Tyto možnosti budou popsány dále. Jedna z hlavních výhod pulzních ventilů spočívá ve spotřebě stlačeného vzduchu. Jelikož u pulzních ventilu dochází k přerušování signálu, dochází také k přerušování dodávky stlačeného vzduchu, což vede k úspoře. Pulzní ventily se obvykle používají pro plyny, ale i pro tekutiny.

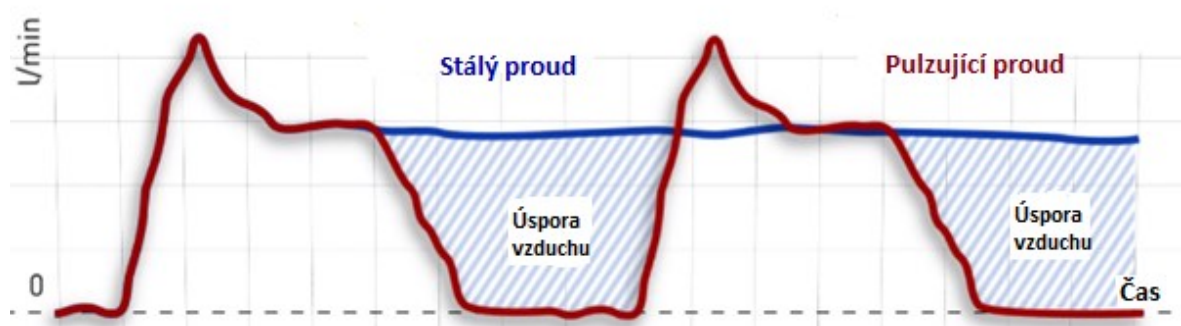
### 4.1 Jednotka úspory vzduchu – Parker

Jednotka úspory vzduchu od firmy Parker je ventil, který mění plynulý proud vzduchu na pulzující. Tento ventil zapříčiní to, že vzduch je vyfukován jako pulzace on/off neboli zapnuto/vypnuto. Pulzující vzduch generuje jakési sekání, což zvyšuje účinnost a dynamiku proudu vzduchu. Jakmile nedochází k vyfukování, tedy jednotka je v režimu vypnuto, nedochází ke spotřebě stlačeného vzduchu. Používáním jednotky úspory vzduchu je možné dosáhnout několika významných výhod, hlavní z nich je samozřejmě snížení spotřeby stlačeného vzduchu, což ušetří spoustu peněz. Pomocí technologie spínání (zapnuto/vypnuto) může tato jednotka ušetřit až 50 % spotřeby vzduchu [11].



Obr. č. 9 – Princip funkce jednotky úspory vzduchu [11]

Na obrázku č. 9 je porovnání výsledného proudu stlačeného vzduchu bez jednotky úspory vzduchu, což je obrázek nalevo, a pak s jednotkou úspory, obrázek napravo. Je zde krásně vidět přerušovaný proud, z čehož také vyplývá úspora stlačeného vzduchu. Každá mezerka je v podstatě úspora. Pokud je navíc k ovládání vzduchu používán elektricky ovládaný elektromagnetický ventil, pak může být jednotka úspory vzduchu snadno a rychle dodatečně namontována do obvodu bez toho, aniž by bylo třeba dělat jakékoliv úpravy v PLC programu [12]. PLC je programovatelný logický automat, který se používá pro řízení různých procesů strojů nebo výrobních linek.



Obr. č. 10 – Graf úspory stlačeného vzduchu [12]

Na obrázku č. 10 je zobrazen průběh stálého proudu (modrá křivka) bez jednotky úspory vzduchu a křivka pulzujícího proudu (červená křivka). Je vidět, že začátek obou křivek je totožný. Zatímco křivka stálého proudu se po nějakém čase pochopitelně ustálí, tak křivka pulzujícího proudu klesne až na nulu, a poté se cyklus opakuje. Tímto procesem dochází k úspoře stlačeného vzduchu, což je v grafu vyobrazeno modrou šrafovanou plochou. Aby bylo dosaženo výhod této jednotky a úspora byla co největší, je třeba jednotku instalovat ne více než 3 metry od trysky, nebo jiného pneumatického prvku, který je umístěn na výstupu. Pro dosažení optimálních výsledků by měla být jednotka instalována do vzdálenosti 1 metru od prvku na výstupu. Pak je úspora zaručená a je možné dosáhnout až ke zmíněným 50 procentům úspory [12].

Společnost Parker nabízí tento ventil ve více variantách, které se liší velikostí průtoku, od čehož se také odvíjí pracovní tlak. Pokud se k ovládání používají manuálně ovládané ventily, jako jsou kulové ventily, je možné jednoduše nainstalovat jednotku, která

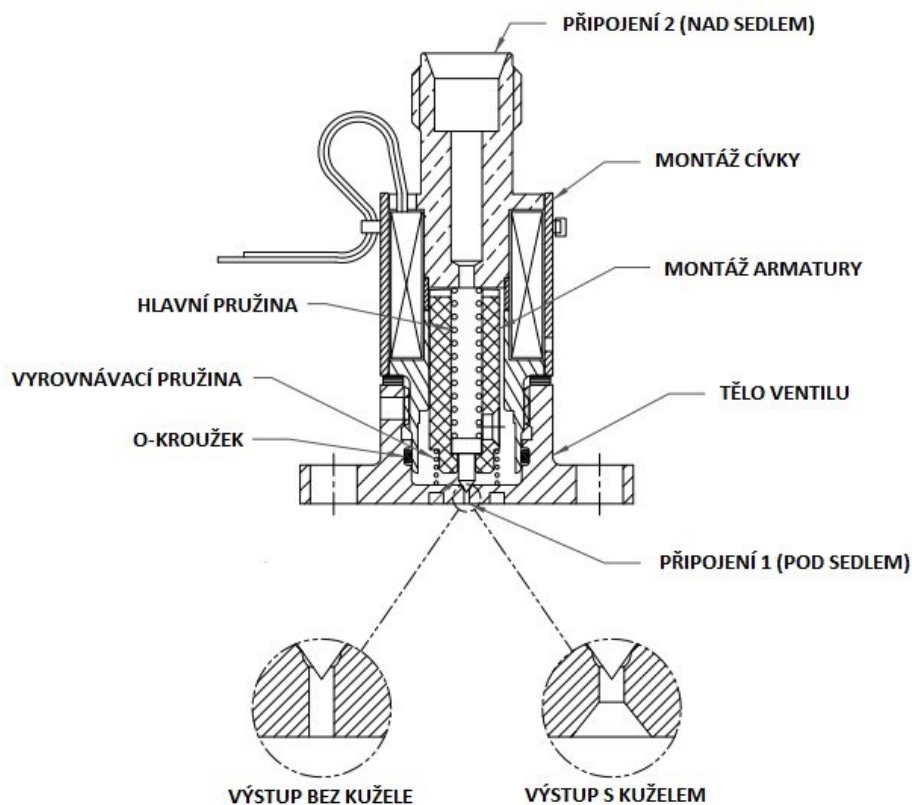
nepotřebuje elektrický signál. Instalace jednotky přinese okamžitou úsporu stlačeného vzduchu.

Jednotka úspory vzduchu se dá používat ve spoustě oblastí, jako například pro odstranění třísek po vrtání, obrábění nebo dalším technologickém procesu. Dále pak při sušení součástí v těžko dostupných místech apod. Zkrátka tato jednotka se používá tam, kde je třeba využít dynamického efektu před statickým, kde chceme dosáhnout většího dynamického efektu anebo kde potřebujeme snížit spotřebu vzduchu. Samozřejmostí je, že cena tohoto ventilu bude vyšší.

#### 4.2 Pulzní ventil firmy Parker

Pulzní ventil, kde dochází k přerušování signálu pomocí elektrického proudu, pracuje na principu krátkých elektrických impulzů, které vytvářejí krátké pulzy stlačeného vzduchu. Typickou aplikací ventilu je pulzace plynů pro laserovou spektroskopii, což je určování složení plynů pomocí laseru [13].

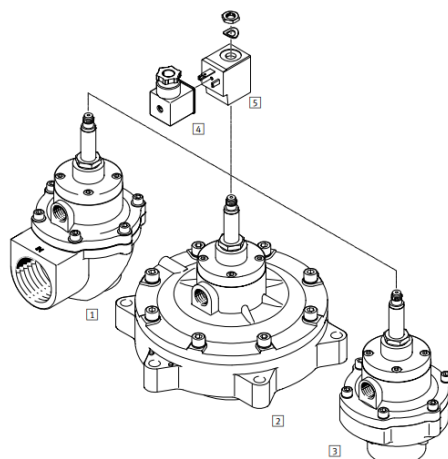
Elektromagnetické pulzní ventily nabízejí vynikající potenciál pro přesnost kontroly analýzy plynů laserové spektroskopie. Na základě vysoké rychlosti, velmi malé netěsnosti, vysokého průtoku a vysoké teploty v pulzním ventilu je možné provést kontrolu. Tento robustní ventil pracuje s extrémní opakovatelností, má vysokou časovou odezvu, která je nastavena přibližně na 2 milisekundy. V případě, že bychom chtěli dosáhnout kratšího časového impulzu, bylo by třeba ventil přehřát. Tělo ventilu je konstruováno z korozi-vzdorné a pasivované (tvorba ochranné vrstvy na povrchu) oceli. Cívky pulzních ventilů jsou určeny pro nepřetržitou funkci [13]. Na obrázku č. 11 je vidět konstrukce tohoto ventilu v řezu.



Obr. č. 11 – Pulzní ventil – řez [13]

#### 4.3 Pulzní ventil firmy Festo

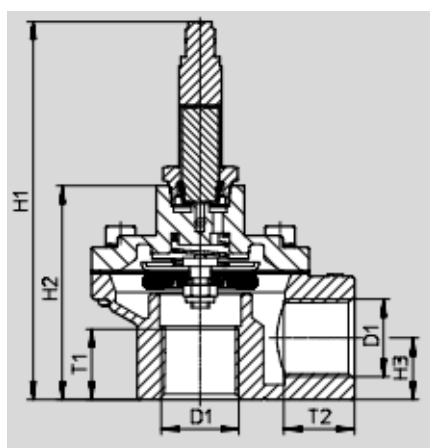
Firma Festo má ve své široké škále pneumatických prvků taky pulzní ventil. Jejich pulzní ventil nese odznačení VZWE a jedná se o nepřímo řízený 2/2 (dvoucestný, dvoupolohový) ventil. Pulzní ventil VZWE spolu s vhodnou elektromagnetickou cívkou vytváří impulzy stlačeného vzduchu, které je možné využít například k mechanickému čištění filtrů a k čištění systémů s prachovými filtry. Ventily jsou řízeny krátkými elektrickými impulzy, které vytvářejí krátké impulzy stlačeného vzduchu na výstupu z ventilu a tento vzduch prochází filtrem proti obvyklému směru průtoku procházejícímu filtračním systémem. A díky tomuto protiproudu vzduchu dochází k uvolňování zachycených částecek. Mezi výhody pulzního ventilu VZWE patří velký průtok, krátký čas otevření a zavření, a taky robustní systém nepřímého řízení [15].



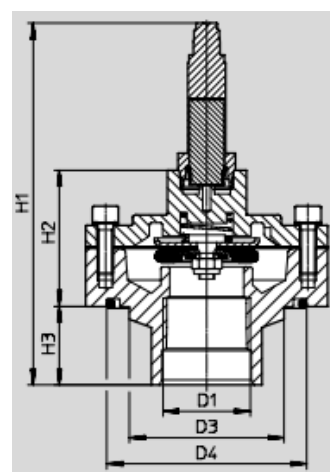
Obr. č. 12 – Typy pulzního ventilu VZWE [15]

Na obrázku č. 12 jsou tři typy pulzního ventilu VZWE. Varianta 1 a 3 jsou pulzní ventily rohové, varianta 1 je úhlová konstrukce a varianta 3 je přímá konstrukce. Varianta 2 je přírubová konstrukce, která má přímou konstrukci. Všechny tyto varianty mají zásuvku (4) a elektromagnetickou cívkou (5). Rovněž jsou všechny tyto ventily konstruovány jako 2/2 ventily s membránou, které jsou v klidové poloze uzavřené, což se nazývá jako „NC“ poloha, neboli „normal closed“. Ventily jsou monostabilní, takže ve ventilu je mechanická pružina, která vždy vrátí ventil do základní polohy. Všechny 3 varianty jsou ovládány elektricky a řízeny nepřímo [15].

Na dalším obrázku č. 13 jsou řezy pulzních ventilů VZWE, a to jak úhlové, tak i přímé konstrukce.



a)

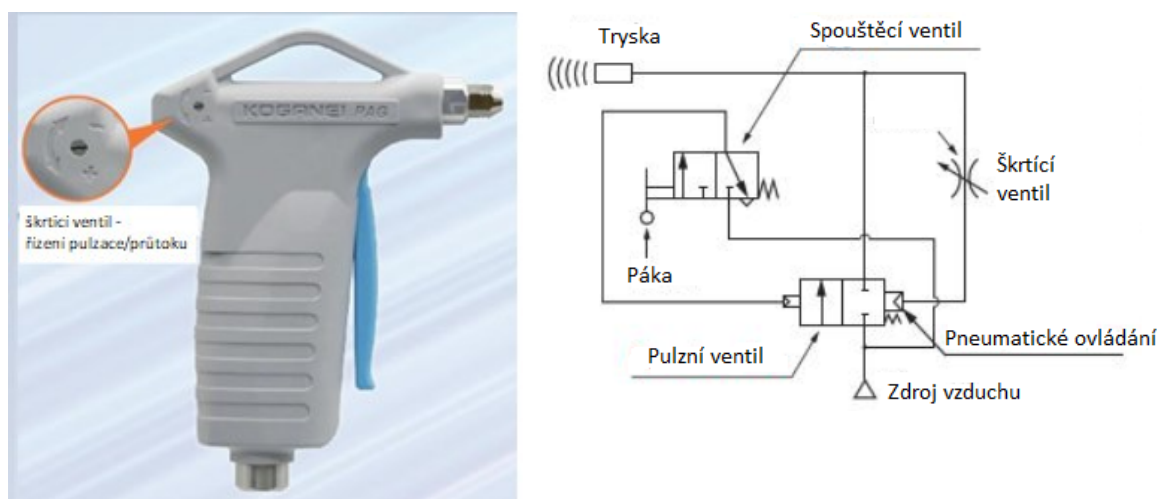


b)

Obr. č. 13 – Řezy pulzními ventily VZWE, a) úhlová konstrukce, b) přímá konstrukce [15]

#### 4.4 Pulzní vzduchová pistole a pulzní ventil – KOGANEI

Existuje pulzní vzduchová pistole, u níž je možné nastavit frekvenci pulzů. Jak je vidět na obrázku č. 14, pomocí škrticího ventilu se nastavuje pulzace. U této pistole není třeba elektrického signálu k vyvození pulzace, jelikož je v pistoli vestavěný generátor, který vytváří impulzy vzduchu [16].



Obr. č. 14 – Pulzní vzduchová pistole a její princip [16]

Na obrázku č. 14 je princip pulzní vzduchové pistole. Pulzní ventil uvnitř pistole je ovládán pneumaticky a princip je takový, že zatáhnutím páčky pistole se odešle signál ze spouštěcího ventilu, aby se otevřel hlavní pulzní ventil. Pulzní ventil se otevře, a tak může vzduch proudit do trysky a dále pak ven. Část vzduchu, která proudí pulzním ventilem do trysky, prochází i přes škrticí ventil, kterým nastavujeme velikost průtoku a tím i čas, za který dojde k naplnění komory pro pneumatické ovládání pulzního ventilu. Ačkoli škrticím ventilem nastavujeme velikost průtoku, v podstatě nastavujeme velikost pulzace. Čím nižší bude hodnota průtoku, tím nižší bude frekvence pulzace a samozřejmě naopak, čím větší bude průtok, tím bude frekvence pulzace větší. Až dojde k akumulaci určitého množství vzduchu, pulzní ventil se poté uzavře, takže přestane proudit vzduch z trysky a zároveň je taky vzduch z komory pro pneumatické ovládání vypuštěn. Jakmile je určité množství z komory vypuštěno, pulzní ventil se znovu otevře (jelikož spouštěcí ventil je stále aktivní) a tedy znovu začne proudit vzduch ven z trysky [16]. Poté se znovu opakuje situace, že se začne hromadit vzduch v komoře pro pneumatické ovládání do doby, než vypne pulzní ventil, který se opět znovu otevře. A takhle to pokračuje pořád dokola, což je princip pulzního ventilu.

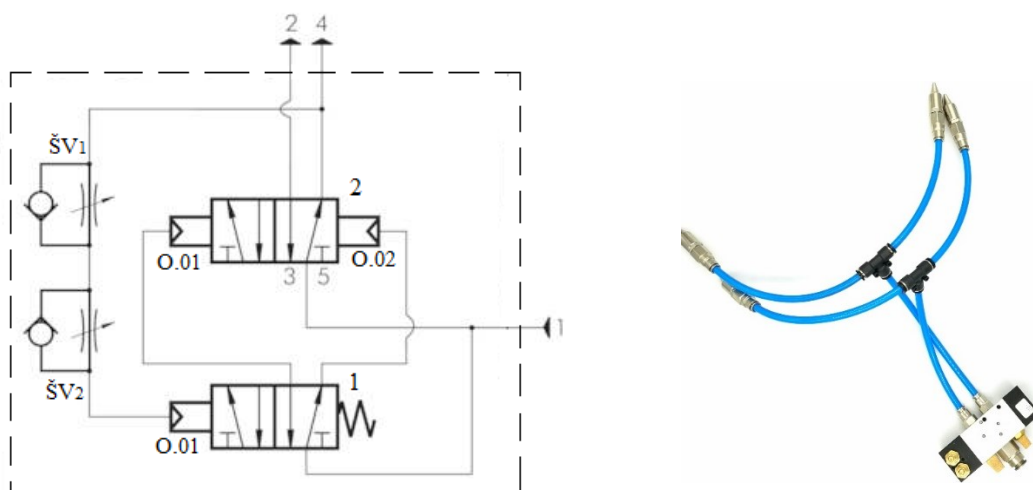
Existuje také pulzní ventil, u něhož je možné nastavit frekvenci pulzů. Pulzace vyfukovaného vzduchu zajišťuje účinnější odstraňování prachu, pilin nebo špon. Aplikací takového pulzního prvku je dosaženo větší účinnosti ve srovnání s prvky, které vytváří kontinuální proud vzduchu. Instalace spočívá v tom, že se pulzní ventil nasadí přímo na vstup vzduchové pistole (nebo trysky) a pistole se v tu chvíli začne chovat jako pulzní vzduchová pistole. Ovládání pulzace je stejné jako u předchozí pulzní ofukovací pistole, tedy frekvence se nastavuje pomocí škrticího ventilu, jak je vidět na obrázku č. 15. Na obrázku č. 15 je rovněž vidět možnost použití pulzního ventilu před ofukovací pistolí. Princip fungování pulzního ventilu je stejný jako pulzní vzduchová pistole, která byla popsána výše.



Obr. č. 15 – Pulzní ventil [16, 17]

#### 4.5 Oscilační ventil

Oscilační ventil je ventil 5/2 (pěticestný, dvoupolohový), bistabilní. Tento ventil funguje tak, že dochází ke kmitání šoupátka a tím je generována pulzace. Funkčnost tohoto ventilu je taková, že pokud přivedeme na vstup ventilu stlačený vzduch, pak budou výstupní kanály střídavě plněny stlačeným vzduchem, jelikož šoupátko bude kmitat z jedné strany na druhou [18]. Oscilační ventil se dá například použít k řízení bistabilního koaxiálního ventilu čili k nepřímému řízení. Koaxiální ventil funguje podobně jako kulový ventil, ale není uvnitř kulička, která slouží k otevírání a zavírání ventilu, ale je uvnitř posuvná část [28]. Takže oscilační ventil pomocí pulzů otevírá a zavírá koaxiální ventil a tím vytváří pulzaci proudu vzduchu. Na obrázku č. 16 je schématická značka oscilačního ventilu a příklad použití.



Obr. č. 16 – Oscilační ventil [18, 19]

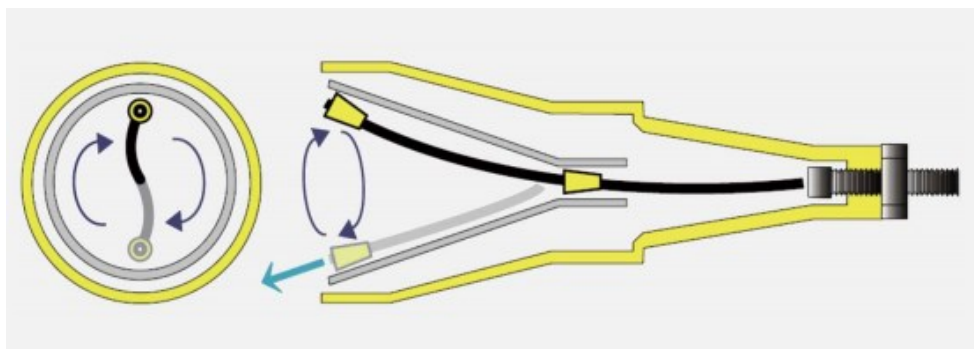
Na obrázku č. 16 je ze schématické značky vidět princip oscilačního ventilu. Ventil 1 i 2 je v poloze 14. Z větve 4 u ventilu 2 proudí vzduch zároveň na ovládání O.01 ventilu 2, přičemž je vzduch regulován pomocí škrticího ventilu ŠV<sub>1</sub>. Po nastaveném čase dojde k přestavění ventilu 1 do polohy 12, takže vzduch začne proudit na ovládání O.01 ventilu 2 a přestaví jej do polohy 12. V tu chvíli dojde u ventilu 2 k propojení cest 4 a 5 a k odvzdušnění této větve. Jelikož už na ovládání O.01 u ventilu 1 není tlak, začne působit pružina u ventilu 1 a přestavovat ventil 1 do polohy 12, přičemž rychlost přestavění je řízena škrticím ventilem ŠV<sub>2</sub>. Takto se celý proces opakuje a dochází ke střídavému plnění větve 2 a 4.

#### 4.6 Rotační tryska Pata-gun

K pulzaci může docházet buďto pomocí pulzního ventilu pneumaticky ovládaného nebo pomocí přerušování elektrického signálu, u těchto obou variant je třeba nějakým způsobem zajistit přerušování signálu. Další možností, jak dosáhnout pulzace, je rotace.

Rotační tryska Pata-gun funguje tak, že v okamžiku, kdy stlačený vzduch proudí hadičkou vyrobenou z měkkého polyuretanu, tak dochází k její rotaci společně s vnitřním rotačním tubusem, po kterém se hadička ovíjí. Z rotující hadičky vychází stlačený vzduch a rotací se vytváří rázová vlna se silným dynamickým efektem [20]. Jelikož se rázová vlna opakuje a dochází k rotaci, pak můžeme výsledný proud vzduchu nazvat jako pulzující. Na obrázku č. 17 je zobrazen princip rázové rotační trysky Pata-gun.



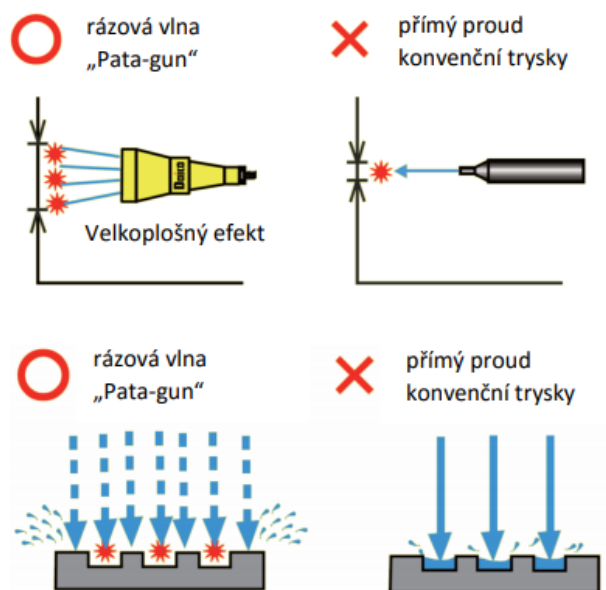


Obr. č. 17 – Princip rázové rotační trysky Pata-gun [20]

Výhodou rotační rázové trysky je jednoduchá montáž – je možné ji využívat samostatně nebo může být i montovaná na ruční pneumatické pistole. Další výhodou je úspora stlačeného vzduchu a úspora ofukovacího času, jelikož je ofukování pro jisté aplikace snazší a efektivnější než stálý proud. Dále pak velkoplošný rozsah ofukování, a také silný efekt rázové vlny s rotací více než 20 ot/sec [20]. Využití rázové rotační trysky může být například v oblasti jako sušení průmyslových dílů, které jsou tvarově složité, v oblasti čištění filtračních materiálů, ofukování nebo vyfoukávání vody a emulzí z různých odlitků nebo obrobků, anebo v oblasti čištění strojů apod.

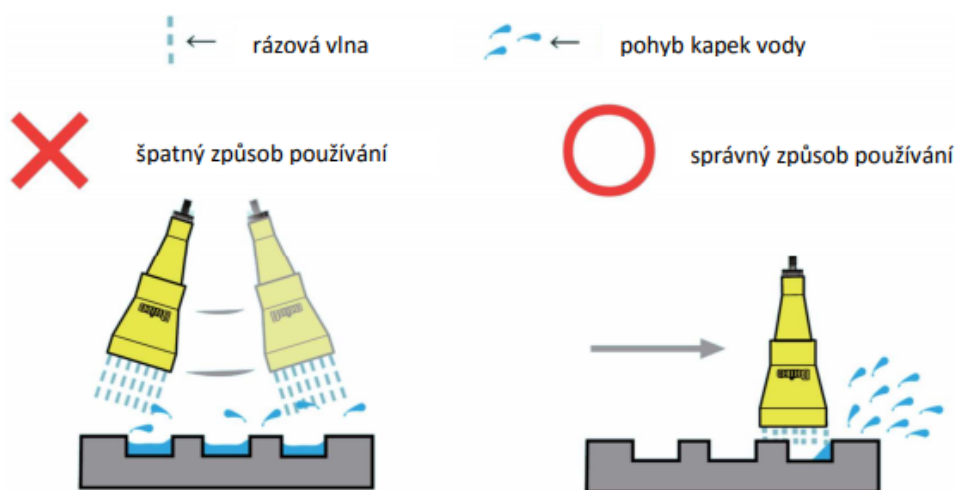
Příklad použití rotační trysky může být u míst, kde běžné ofukování nestačí, jelikož se tam proud vzduchu nedostane, resp. nedokáže vyfouknout všechnu kapalinu nebo nečistotu z daného záhybu. Jedna nejmenovaná firma, která vyrábí energetické nápoje, se rozhodla, že jejich láhve budou mít vzhled ve tvaru ruky, která vztyčuje jeden prst. Takhle tvarovaná láhev má samozřejmě spoustu těžko dostupných míst. Během naplňování láhvi nápojem dochází k tomu, že nápoj často vyteče i na láhev a drží se v záhybech, což způsobuje plesnivění a zápach. A právě na tyto těžko přístupná místa stálý proud vzduchu nestačí. Proto jsou zde použity rotační trysky, které silným rázem dostanou kapalinu ze záhybů.

Na následujících obrázcích je porovnání efektu rotační trysky a jiné konvenční trysky, a také správný způsob použití rotační trysky, aby bylo správného efektu dosaženo.



Obr. č. 18 – Porovnání efektu rotační trysky a konvenční trysky [20]

Na obrázku č. 18 je pro porovnání zobrazen efekt, který vytváří rotační rázová tryska oproti běžným tryskám s kontinuálním proudem. Je patrné, že rotační rázová tryska má větší plošný efekt, kdežto běžná tryska má výsledný proud vzduchu ve tvaru jakoby paprsku čili nezabírá tak velkou plochu. Tohle je rozhodně velká výhoda rotační trysky.

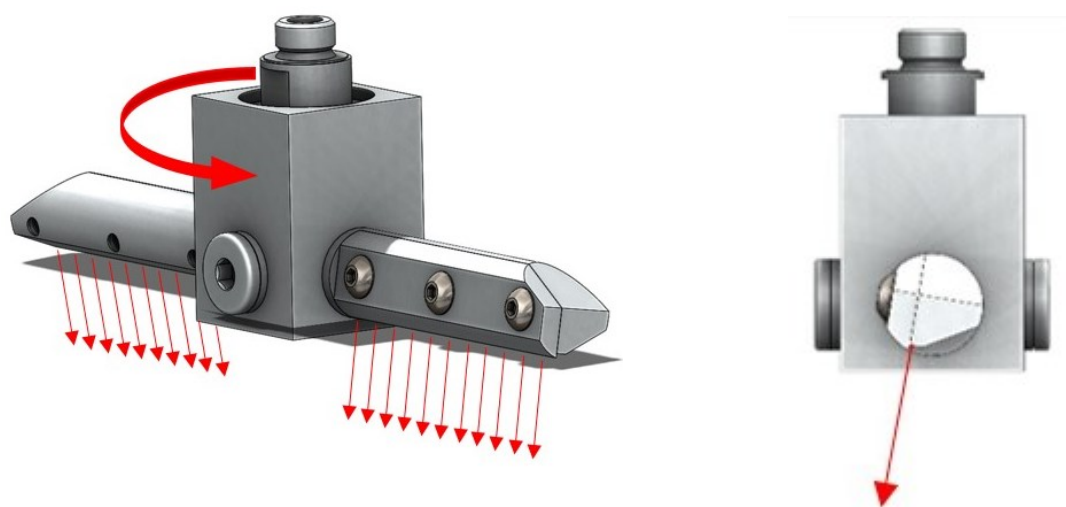


Obr. č. 19 – Správné použití rotační rázové trysky [20]

Na obrázku č. 19 je znázorněno, jak by se měla správně rázová rotační tryska používat, aby byl plně využit její potenciál. Správný způsob není tryskou kývat ze strany na stranu, jelikož takhle nedojde k vyfoukání kapaliny z daného místa. Správný způsob je takový, že rázová tryska je umístěna 10 mm až 20 mm od místa, jež chceme vyfukovat. Toto je vzdálenost, při které bude mít tryska největší efekt. Dostatečného efektu se dá dosáhnout i ve vzdálenosti 100 mm, ale efekt se s rostoucí vzdáleností samozřejmě snižuje [20]. Dalším krokem k dosažení plného efektu je s tryskou rovnoměrně přejíždět z jedné strany na druhou, a tím kapalinu postupně vyfukávat z prostoru.

#### 4.7 Rázový rotační vzduchový nůž

Tento typ rotačního vzduchového nože funguje na stejném principu jako klasický vzduchový nůž, takže mezi víkem a tělem je umístěna planžeta, která tvoří štěrbinu o určité tloušťce, a tím dochází k plochému a souvislému proudu vzduchu. Oproti klasickému noži zde navíc dochází k rotačnímu pohybu. Tělo nože s víkem, které jsou spojeny šrouby, jsou rovněž připojeny ke kostce, která se vlivem proudění vzduchu otáčí a dochází tak k rotaci nože. Rychlost rotace se nastavuje pomocí štěrbiny čili pomocí tloušťky planžety a úhlem natočení nožů. Čím větší bude úhel a tloušťka planžety, tím bude rychlost rotace vyšší. Podobně jako u předchozích rotačních trysek, tak i tento rotační nůž vytváří rázovou vlnu tlakového vzduchu, což může být využito u náročnějších aplikací, kde je třeba dynamické ofukování [21].

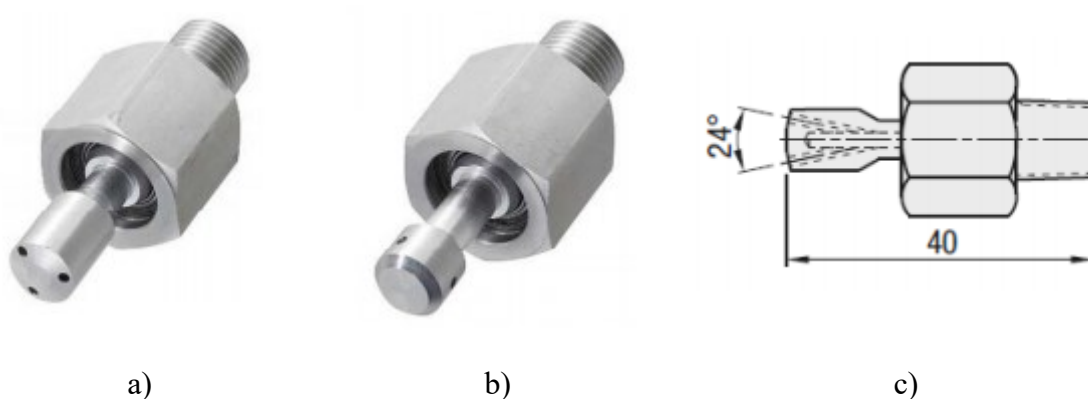


Obr. č. 20 – Rotační rázový vzduchový nůž [21]

Na obrázku č. 20 je konstrukce rotačního rázového nože a princip jeho funkce. Je možné nastavit sklon nože, jak je vidět vpravo na obrázku č. 20. Tento nůž se používá například při čištění nebo sušení větších nádob, které mají různé záhyby ve dnu a běžná tryska je příliš malá a trvalo by déle nádobu vysušit. Výhodou tohoto nože oproti rotačním tryskám je ten, že rotační nůž zaujímá větší plochu, jelikož vytváří souvislý proud.

#### 4.8 Rotační tryska RT

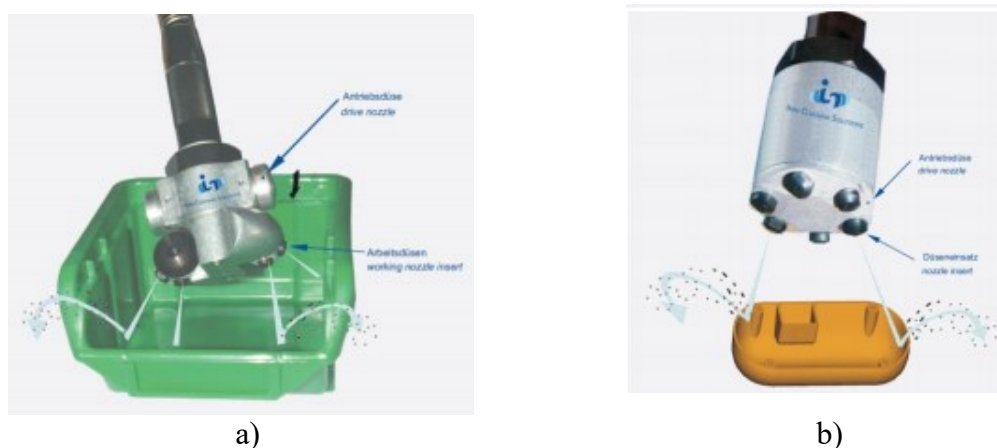
Tato rotační tryska má dvě konstrukční provedení, která jsou principiálně stejná, ale liší se ve výstupních otvorech. Konstrukce trysek je taková, že se skládá z nepohyblivé části, do níž je vložena část pohyblivá, která se dostává do pohybu ve chvíli, kdy tryskou začne proudit stlačený vzduch. Jedna z konstrukcí je konstrukce přímá, což znamená, že výstupní otvory jsou v ose s pohyblivou částí, takže proud vzduchu směřuje rovným směrem. Na obrázku č. 21a) je přímá konstrukce. Rotace je u této trysky způsobena tím, že otvory jsou vrtány pod určitým úhlem a jakmile začne otvory proudit vzduch, dochází k rotaci. Jelikož jsou v trysce tři otvory u obou konstrukcí, namísto obvyklého jednoho otvoru, není tedy výstupní proud stálý, ale vytváří rázy. Druhá konstrukce je naprosto stejná s tím rozdílem, že výstupní otvory jsou kolmo k ose pohyblivé části a opět jsou otvory vrtány pod určitým úhlem, aby docházelo k rotaci. Na obrázku č. 21 jsou konstrukce rotační trysky, a také řez tryskou [22].



Obr. č. 21 – a) přímá konstrukce, b) kolmá konstrukce, c) řez rotační tryskou [22]

#### 4.9 Další typy rotačních trysek

Dalšími typy rotačních trysek jsou například trysky od firmy Lontech, která nabízí široký výběr zařízení pro čištění. Firma Lontech nabízí několik typů rotačních trysek, které se liší provedením konstrukce a parametry, nicméně principiálně fungují všechny stejně. U rotační rázové trysky Pata-gun byl princip takový, že volně umístěná hadička vlivem proudu vzduchu rotovala ve vnitřním tubusu. Naopak u těchto rotačních trysek se pohybuje v podstatě celé těleso. Jak už bylo řečeno, tyto trysky se liší konstrukcí, a tak podle dané konstrukce se také odvíjí aplikaci využití trysky.



Obr. č. 22 – Typy rotačních trysek nabízející firma Lontech [23]

Na obrázku č. 22 jsou dva typy rotačních trysek, které mají každá jinou konstrukci. Konstrukce na obrázku b) je vhodná pro čištění obtížných míst jako třeba nádoby nebo prohlubně. Tato tryska má poměrně malou a úzkou hlavici, a tak se s ní dá dostat právě do takových prostor. Naproti tomu tryska na obrázku a) má větší rozptyl a je vhodná k čištění větších ploch. U obou těchto konstrukcí je možné nastavit úhel působení trysek. Výhodou těchto trysek je účinnost při čištění a odstraňování nečistot. Výhodou je taky to, že není třeba dalšího pohonu pro rotaci trysky, jelikož rotuje celé těleso, ve kterém jsou trysky umístěny [23].

#### 4.9.1 Odsávací hlavice s rotačními tryskami

Odsávací hlavice jako taková není přímo rotační tryska, ale spíš aplikace využití rotační trysky. Tento odsávací systém funguje tak, že v zařízení jsou umístěny na vstupu i výstupu antistatické tyče, které neutralizují daný povrch od elektrického náboje. Uprostřed zařízení jsou pak umístěny rotační vzduchové trysky, které svým proudem vzduchu (rotací) nasměrují nečistoty do odsávací hlavice [24]. Na obrázku č. 23 je tento princip nakreslen. Odsávací zařízení se dá použít například pro čištění vrtaných otvorů. Jelikož je možné nastavit úhel působení trysek, průměr trysek, který ovlivňuje výstup vzduchu, dále je možné nastavit otáčky trysek, pak je čištění těchto otvorů velmi účinné. Spotřeba stlačeného vzduchu je zde dána počtem rotačních trysek a průměrem těchto trysek. Samozřejmě čím více trysek a čím větší průměry, tím bude spotřeba vyšší.

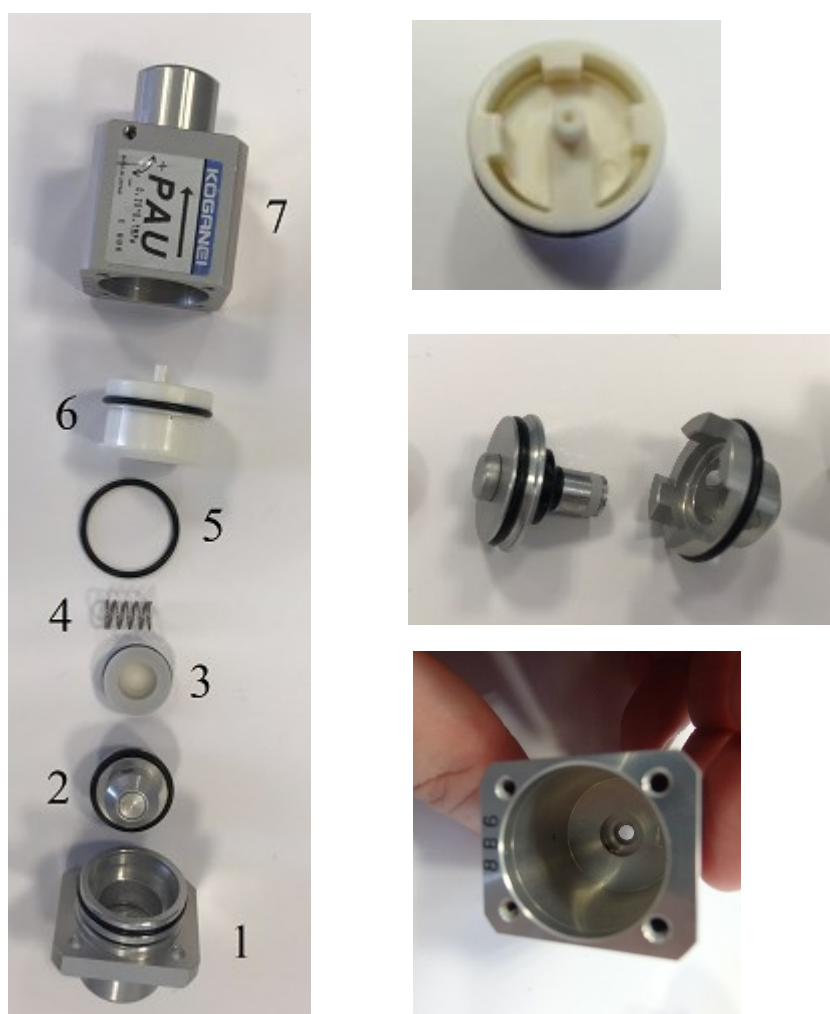


Obr. č. 23 – Odsávací hlavice [24]

## 5. Porovnání dynamických ofuků

### 5.1 Konstrukce pulzního ventilu a pulzní pistole Koganei

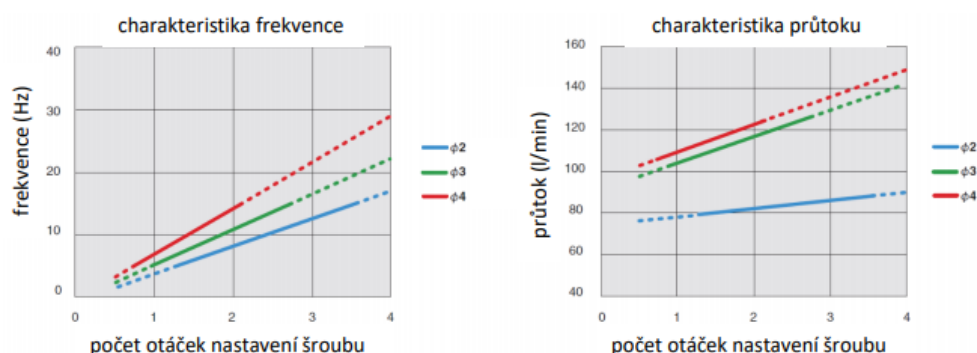
V rámci experimentálního ověřování a porovnávání rotačních trysek a pulzních ventilů jsem některé pulzní ventily rozebral, abych zjistil, jak přesně dané ventily fungují. Dle schématické značky se dá funkčnost a princip pulzních ventilů poměrně dobře pochopit, nicméně schématická značka velmi zjednodušeně ukazuje funkčnost uvnitř ventilu. Nejprve jsem rozebral pulzní ventil Koganei. Na dalším obrázku jsou vidět jednotlivé součásti tohoto ventilu a některé z nich i detailněji.



Obr. č. 24 – Součásti pulzního ventilu Koganei

Pulzní ventil Koganei se skládá z těchto součástí: 1 – víko; 2 – píst/tělo pístu; 3 – talíř pružiny; 4 – pružina; 5 – o-kroužek; 6 – těleso ventilu; 7 – tělo. Princip ventilu je takový, že do těla ventilu (7) je vloženo těleso ventilu (6), na němž je dále položen o-kroužek (5). Tento o-kroužek v podstatě rozděluje pulzní ventil na 2 části. A to na část, kterou můžeme nazvat vstupní nebo tlaková a na část ovládací. Víkem (1) je přiveden vzduch, který zatlačí na píst (2), který je umístěn v těle pístu. V těle pístu, jež je kruhové průřezu, jsou po obvodu vyfrézovány (4) obvodové drážky čtvrtkruhové, jimiž začne proudit vzduch, jakmile je píst tlakem vzduchu zatlačen. Tento vzduch dále projde skrze vyfrézované otvory v tělese ventilu (6) na výstup. Tím, že píst zatlačí na talíř pružiny (3), umožní proudit vzduchu vrtanou dírou do oblasti pod talíř pružiny (3) přes ovládací cestu a společně se silou pružiny (4) tak nadzvedne talíř pružiny (3), čímž zavře přívod vzduchu do ovládací komory. Vzduch proudící do ovládací komory, procházející přes škrticí ventil, slouží k regulaci průtoku, a tím i k regulaci rychlosti naplnění ovládací komory. Poté, co je přívod do ovládací komory uzavřen, stlačený vzduch začne pomalu odcházet z ovládací komory na výstup. V ovládací komoře začne klesat tlak, a tak stlačený vzduch na vstupu opět přetlačí talíř pružiny (3), a tak vzduch začne opět proudit na výstup a zároveň do ovládací komory, což za nějakou dobu opět způsobí přetlačení talíře pružiny (3) zespodu talíře a uzavře průchod vzduchu ventilem. Tento princip se stále opakuje a tím vzniká pulzace. Co se týká parametrů ventilu, tak pracovní tlak je 0,25 až 0,7 MPa, provozní teplota 5 až 50 °C a médium, pro které je ventil konstruován, je tlakový vzduch nemazaný.

Na dalším obrázku je charakteristika frekvence a průtoku pulzního ventilu, která byla měřena výrobcem.



Obr. č. 25 – Charakteristika frekvence a průtoku měřena výrobcem pulzního ventilu



Výrobce měřena závislost frekvence a průtoku na počtu nastavených otáček pro různé průměry trysek. U těchto charakteristik není uvedeno, při jakém tlaku bylo měření provedeno, proto jsem provedl měření při různých tlacích.

V rámci experimentu jsem rozebral taky pulzní pistoli Koganei, která je principiálně stejná jako pulzní ventil Koganei s tím rozdílem, že navíc v sobě obsahuje 3/2 (třícestný, dvoupolohový) bistabilní ventil v klidové poloze uzavřený, který je ovládaný pákou. Ovládání 2/2 (dvoucestný, dvoupolohový) bistabilního ventilu v klidové poloze uzavřeného, který způsobuje pulzaci, je nepřímé. Tento ventil je ovládaný právě 3/2 ventilem, tzn., že stisknutím páky umožním proudit stlačenému vzduchu skrz 3/2 ventil a stlačený vzduch procházející tímto ventilem přepne 2/2 ventil do otevřené polohy. Takže poté, co je stisknutím páky zajištěno ovládání 2/2 ventilu, dochází ke stejnému principu, jako byl popsán u pulzního ventilu. Technické parametry pulzní pistole jsou stejné jako parametry pulzního ventilu.

Na obrázku č. 26 je rozebraná pulzní pistole Koganei. Na obrázku jsem označil jen 2/2 ventil (1), škrticí ventil (2), páku (3) a šoupátko 3/2 ventilu (4), jelikož ostatní součástky jsou stejné jako u pulzního ventilu Koganei.

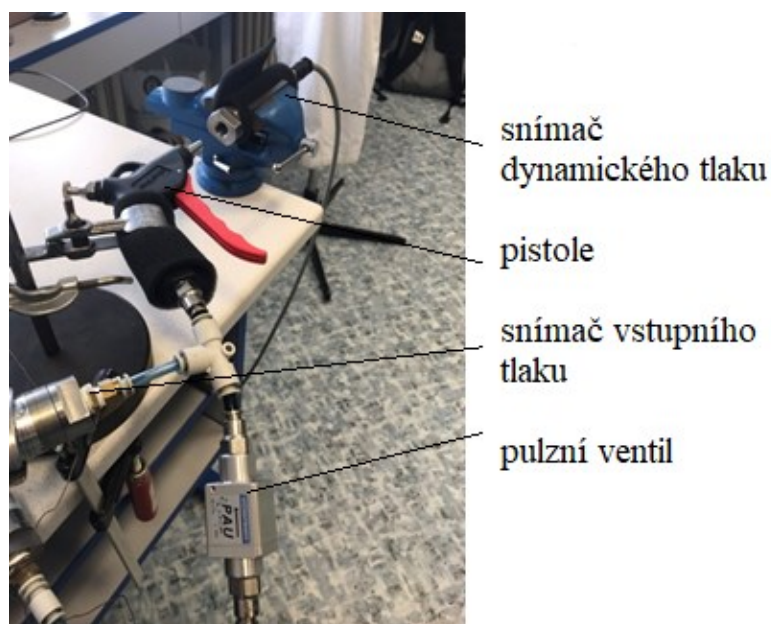


Obr. č. 26 – Součástky pulzní pistole Koganei

## 5.2 Realizace a postup měření č. 1

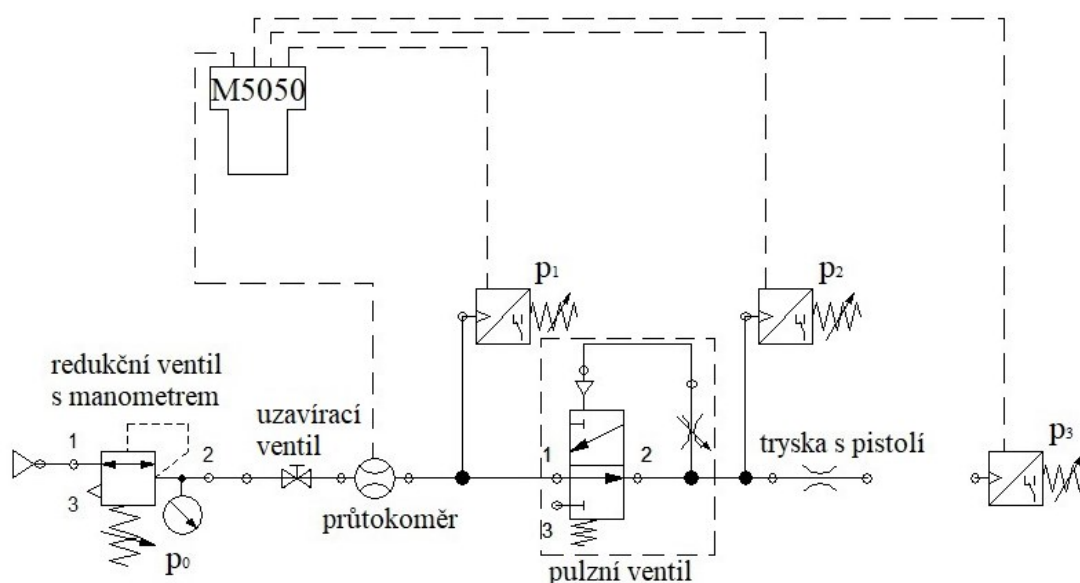
Jedním ze zadaných úkolů v mé diplomové práci je experimentální ověření a porovnání typů dynamického čištění. Při měření v laboratoři jsem se zaměřil na porovnání pulzních prvků. Ve své diplomové práci jsem popsal několik různých druhů dynamického ofuku. Jelikož každý dynamický ofuk funguje na jiném principu, není možné porovnat jeden stejný výstupní parametr u všech typů ofuku. Pro své měření jsem tedy vybral takové typy, u kterých je možné porovnat výstupní hodnoty co nejjednodušeji a nejpřesněji. Z toho důvodu jsem porovnával pulzní ventil Koganei v kombinaci s obyčejnou vzduchovou pistolí a pulzní vzduchovou pistolí Koganei. Provedl jsem několik měření, přičemž jsem měnil parametry u obou variant a jednotlivé výsledky zaznamenával. Tryska byla od snímače tlaku, který byl umístěn na výstupu, vždy ve vzdálenosti 30 milimetrů. Doba měření byla pro všechna měření nastavena na 3 sekundy, přičemž záznam hodnot byl nastaven tak, aby se hodnoty zapisovaly každých 10 milisekund.

Měření jsem provedl tak, že jsem do obvodu zapojil průtokoměr SD 6000 – další informace o všech použitých prvcích budou popsány v další kapitole – dále jsem použil tři snímače tlaku, a pak samotné pulzující prvky. Při prvním měření jsem měřil pulzní ventil Koganei, který byl zapojen před obyčejnou vzduchovou pistolí, na niž byla nasazena obyčejná vzduchová tryska, jejíž průměr byl 2 mm. Na obrázku č. 27 je fotka z měření, kde je vidět varianta prvního zapojení prvků.



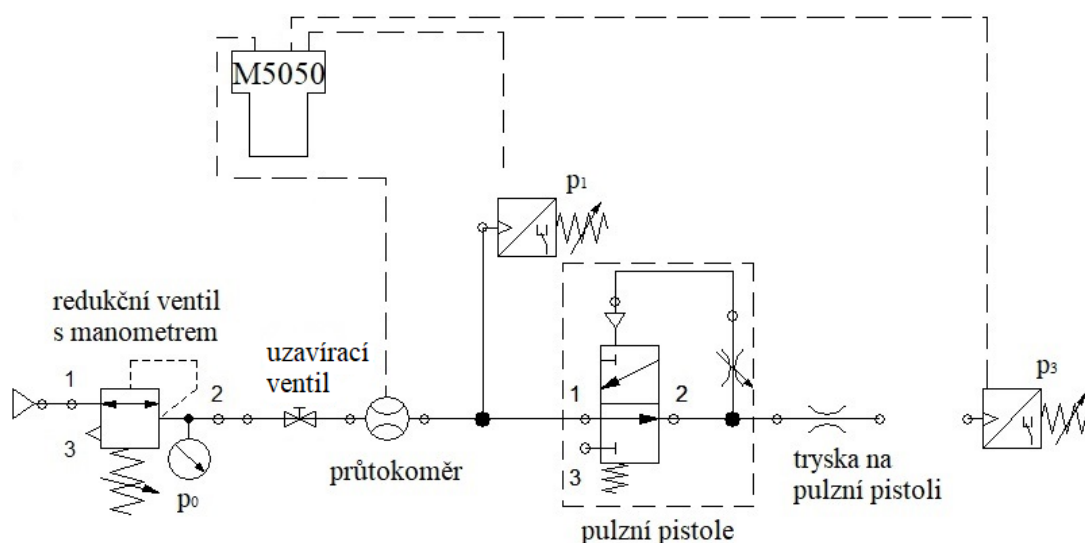
Obr. č. 27 – Pulzní ventil s obyčejnou pistolí a obyčejnou tryskou

Na škrticím ventilu umístěném na pulzním ventilu je možné nastavit maximálně 4 otáčky. Toto měření probíhalo tak, že jsem nejprve škrticí ventil zcela uzavřel, abych mohl nastavovat přesný počet otáček, a poté postupně nastavoval jednu až čtyři otáčky. Pro jednotlivé otáčky jsem pak nastavoval hodnotu vstupního tlaku ( $p_0$ ) pomocí filtr-regulátoru na hodnoty tři až šest bar. Rozmezí tlaků bylo zvoleno na základě parametrů pulzního ventilu. Při každé hodnotě vstupního tlaku jsem zaznamenával průtok před pulzním ventilem, hodnotu tlaku před a za pulzním ventilem, a nakonec hodnotu tlaku na výstupu z trysky. Poté, co jsem pro danou hodnotu otáček zaznamenal všechny tyto hodnoty tlaků ( $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ) a průtok ( $Q$ ) při různých tlacích, zvýšil jsem nastavení pulzního ventilu o jednu otáčku. Všechny tyto hodnoty jsem zaznamenával do měřící přístroje M5050 a pomocí programu hydrowin pak data zapsal do excelu, kde jsem je následně pomocí grafů vyhodnotil. U hodnot tlaků  $p_1$ ,  $p_2$  a  $p_3$  jsem bral vždy nejvyšší dosaženou hodnotu. Na dalším obrázku je schéma zapojení jednotlivých prvků během tohoto měření.



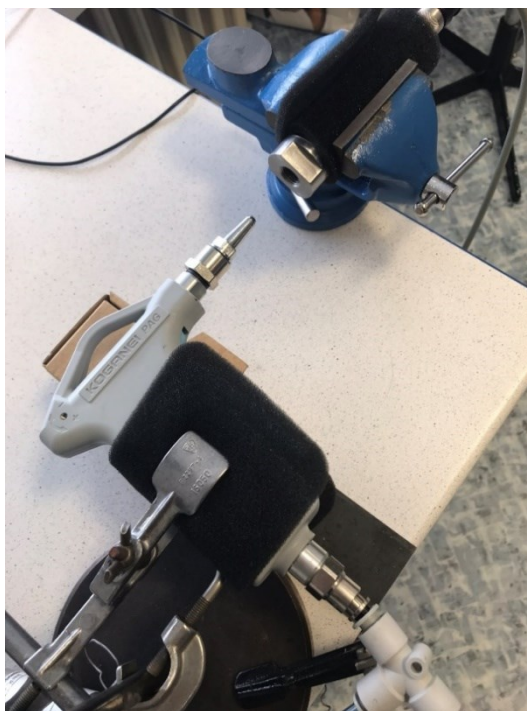
Obr. č. 28 – Schéma měření pulzního ventilu

Při dalším měření jsem měřil pulzní pistol Koganei, na kterou byla namontována stejná tryska, kterou jsem použil při měření pulzního ventilu s obyčejnou vzduchovou pistolí. I při tomto měření jsem měřil průtok ( $Q$ ) před pulzní pistolí, a také tlak před pistolí ( $p_1$ ). Už jsem ale neměřil tlak za pistolí, ale jen tlak na výstupu z pistole ( $p_3$ ). Postup měření byl stejný jako v předchozím případě, tzn., že jsem pro jednotlivé nastavení otáček u pulzní pistole měnil tlaky a zaznamenával hodnoty tlaku ( $p_1$  a  $p_3$ ) a průtoku ( $Q$ ). Rozdíl byl v tom, že maximální počet otáček u pulzní pistole nebyl čtyři, ale tři. Na dalším obrázku je zjednodušené schéma měření pulzní pistole.



Obr. č. 29 – Schéma měření pulzní pistole

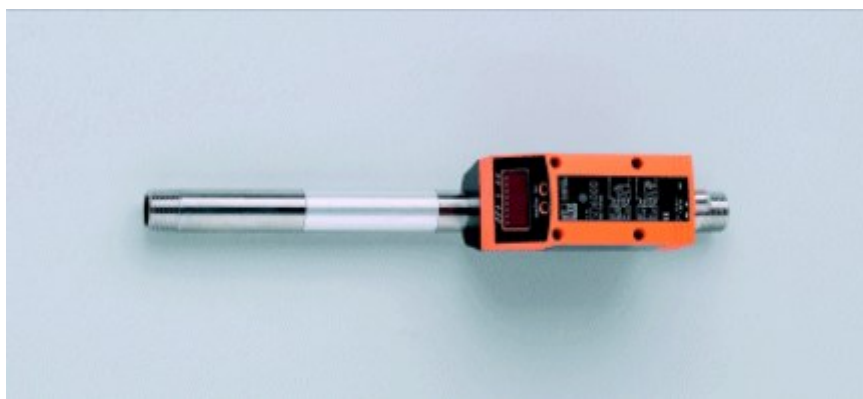
Naměřené hodnoty jsem rovněž zaznamenával do měřicího přístroje M5050 a z něj jsem hodnoty následně přenesl do excelu a vyhodnotil je. Na obrázku č. 29 a stejně tak i na předchozím, kde je pulzní ventil s obyčejnou pistolí a obyčejnou tryskou, je vidět, jakým způsobem byl měřen tlak na výstupu z trysek. Pro měření výstupního tlaku jsem zvolil způsob, kdy jsem do svěráku umístil snímač tlaku PR15 a vzduchovou trysku nasměroval tak, aby vzduch proudící z trysky směřoval přímo do snímače. Na dalším obrázku je foto z měření pulzní pistole.



Obr. č. 30 – Pulzní pistole s obyčejnou tryskou

#### 5.2.1 Použité prvky při měření

Pro měření byl použit průtokoměr SD6000 od společnosti ifm, který má měřicí rozsah proudění 4–1250 Nl/min. Zobrazené hodnoty průtoku jsou již přepočtené na normální podmínky, což je tlak 101 325 Pa a teplota 15 °C. Připojení průtokoměru je R1/2 (DN15) a rozsah teploty je 0–60 °C. Odolnost vůči tlaku až 1,6 MPa a doba odezvy je menší než 0,1 sekundy [25].



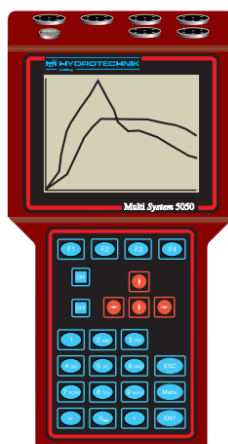
Obr. č. 31 – Průtokoměr SD6000 od firmy ifm [25]

Tlak byl měřen tlakovým senzorem PR15 od firmy Hydrotechnik, jehož měřicí rozsah -0,1 až 0,6 MPa může odpovídat hodnotě výstupního signálu, která může být buď 0–20 mA nebo 4–20 mA. Při tomto měření měl tlakový sensor  $p_1$  rozmezí 0-20 mA a tlakové sensory  $p_2$  a  $p_3$  rozmezí 4-20 mA. a Deklarovaná přesnost snímače je  $\pm 0,3 \%$  a teplotní rozsah -40 až 100 °C. Maximální přetlak je 1,5krát nominální tlak. Tlak, při kterém dojde k poškození sensoru, je 3 třínásobně vyšší, než je hodnota nominálního tlaku [26].



Obr. č. 32 – Tlakový senzor PR15 do firmy Hydrotechnik [26]

Tlak i průtok byl zobrazován zařízením Multi System M5050 od firmy Hydrotechnik. Před začátkem měření je třeba si nastavit několik málo věcí a sice kanály, které chceme zobrazovat, takže kanály, do nichž máme napojeny snímače tlaku a průtokoměr, dále pak hodnoty, v jakých chceme měřit, dobu měření, dobu, po které chceme zaznamenávat hodnoty a další.



Obr. č. 33 – M5050 od firmy Hydrotechnik [27]

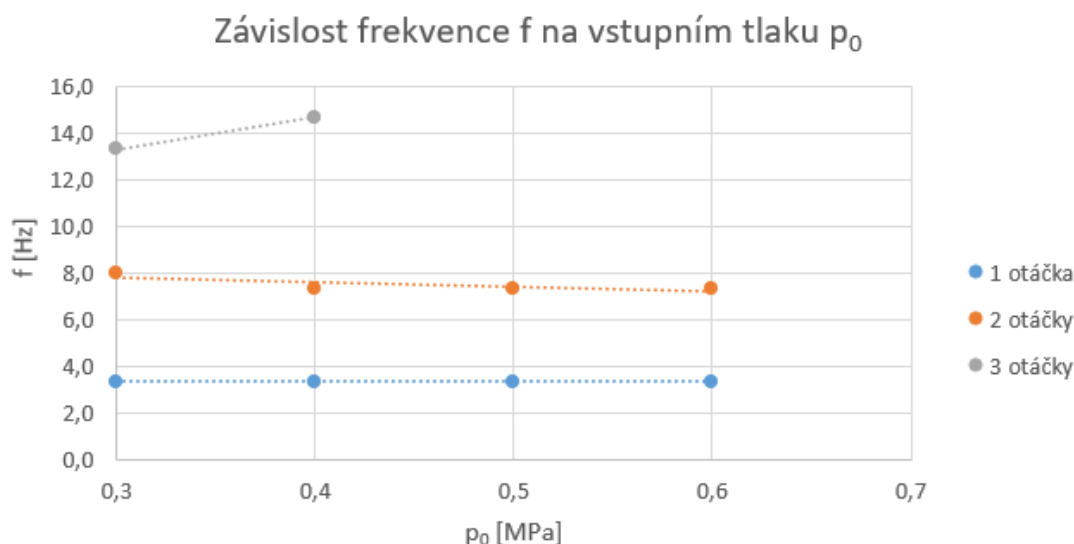
Dále byla samozřejmě použita pulzní pistole a pulzní ventil, avšak tyto prvky byly popsány už dříve. Obyčejnou vzduchovou pistolí a obyčejnou trysku zde blíže popisovat nebudu, jelikož se jedná o běžné prvky, které nemají žádné větší specifikace.

### 5.2.3 Vyhodnocení měření č. 1

Po provedení všech měření jsem hodnoty zaznamenané v měřícím zařízení M5050 přenesl do excelu a začal je postupně vyhodnocovat. Hodnoty, které jsem vyhodnocoval, byl tlak na výstupu ( $p_3$ ), průtok ( $Q$ ) a frekvence pulzů ( $f$ ). Všechny tyto veličiny jsem porovnával v závislosti na vstupním tlaku, tzn. jak se mění tlak na výstupu, průtok a frekvence se změnou vstupního tlaku. Frekvenci pulzů jsem vyhodnotil tak, že jsem si vždy spočítal, kolik pulzů bylo zaznamenáno za dané měření, tedy za dobu 3 sekund, a vložil do vzorce, kde v čitateli byla doba měření a ve jmenovateli počet pulzů za dobu měření. Měřený tlak jsem vyhodnocoval v megapascalích, průtok v litrech za minut a frekvenci v hertzech.

### 5.2.4 Měření pulzního ventilu Koganei

Nejprve jsem se zaměřil na porovnání u jednoho měření, tj. měření pulzního ventilu s obyčejnou pistolí a obyčejnou pistolí. Jak už bylo řečeno, tak jsem vyhodnocoval snímané veličiny (výstupní tlak, průtok a frekvence) v závislosti na změně vstupního tlaku. Frekvenci bylo v tomhle měření možné vyčíst jak z tlaku před a za pulzním ventilem, tak taky z tlaku měřeného na výstupu. V grafu na obr. 34 je vidět průběh frekvence se zvyšujícím se vstupním tlakem.

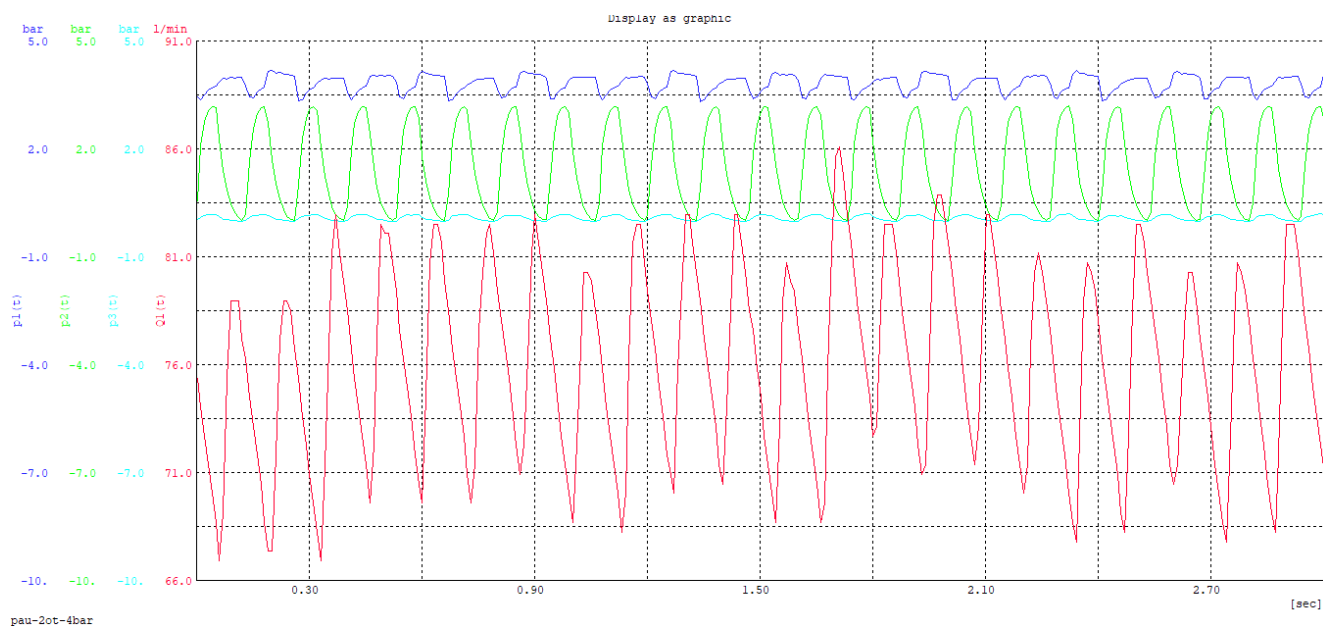


Obr. č. 34 – Graf závislosti frekvence na vstupním tlaku

Při zjišťování frekvence u pulzního ventilu nebylo možné zjistit počet pulzů při nastavení škrticího ventilu na 4 otáčky. Při čtyřech otáčkách už ventil nepulzoval, ale jednalo se o souvislý proud a z toho důvodu není v grafu zanesena frekvence při 4 otáčkách. Při nastavení tří otáček na pulzním ventilu nebylo možné změřit frekvenci při hodnotě vstupního tlaku 0,5 a 0,6 MPa. Frekvence pulzního ventilu je v tomhle případě závislá na vstupním tlaku – je-li vstupní tlak příliš vysoký, pak ventil nepulzuje. Nicméně z grafu je vidět, že frekvence je při daných otáčkách téměř konstantní. Patrný je ale rozdíl v hodnotě frekvence, která se zvyšuje s počtem nastavených otáček na škrticím ventilu. Se zvyšováním otáček dochází k rychlejšímu naplnění ovládací komory, jelikož propouštím větší množství vzduchu přes škrticí ventil, takže dochází k rychlejší pulzaci – vyšší frekvenci.

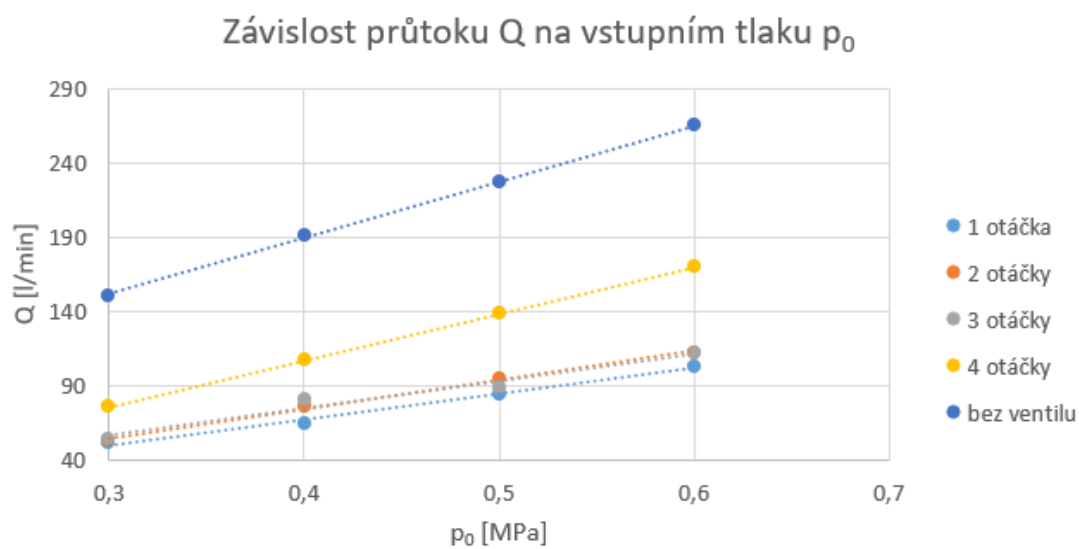
Na dalším obrázku je pro ukázkou záznam z měření, kde jsou zobrazeny všechny měřené hodnoty. Jedná se o měření, kdy na pulzním ventilu byly nastaveny 2 otáčky a tlak byl nastavený na 0,4 MPa. Červená křivka zobrazuje průtok, tyrkysová tlak na výstupu ( $p_3$ ), zelená křivka ukazuje tlak za pulzním ventilem ( $p_2$ ) a modrá křivka tlak před pulzním ventilem ( $p_1$ ).





Obr. č. 35 – Záznam měření 1

Na dalším obrázku je graf závislosti průtoku na změně vstupního tlaku.

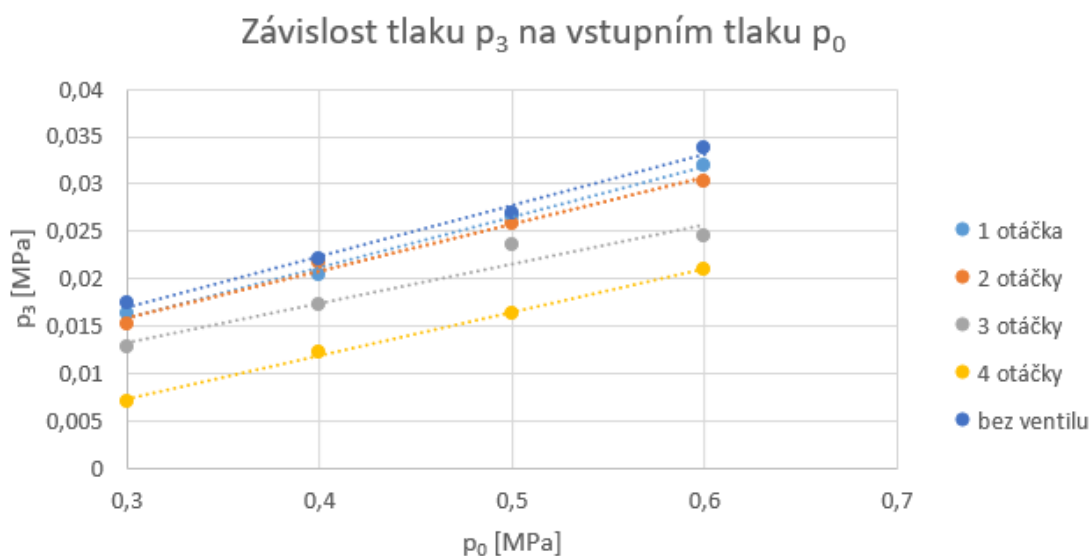


Obr. č. 36 – Závislost průtoku na vstupním tlaku

Na obrázku č. 36 je průběh závislosti průtoku na vstupním tlaku při jednotlivých otáčkách, které byly nastaveny na škrticím ventilu. Graf je doplněn o křivku (tmavě modrá), která zobrazuje průtok obyčejnou pistolí s obyčejnou tryskou bez pulzního ventilu, tedy plný nepřerušovaný proud. Průběh průtoku bez pulzního ventilu jsem zde vložil proto, aby byl dobře vidět rozdíl spotřeby vzduchu ve srovnání s pulzním ventilem. Spotřeba stlačeného vzduchu bez pulzního ventilu je od 150 do 270 NI/min. Z výsledků měření je patrné, že s rostoucím tlakem stoupá hodnota průtoku a rovněž s rostoucím počtem otáček rostou hodnoty průtoku při daném tlaku. Vstupní tlak tedy ovlivňuje průtok, změna průtoku je v řádech desítek litrů.

Při nastavení jedné, dvou a tří otáček je průběh závislosti téměř podobný a spotřeba je zhruba od 50 do 115 NI/min. Avšak při nastavení čtyř otáček na pulzním ventilu je průběh spotřeby vyšší, hodnota spotřeby je řádově od 80 do 170 NI/min. Důvodem vyšší spotřeby je to, že při nastavení 4 otáček už nedochází k pulzaci. Nicméně při čtyřech otáčkách na pulzním ventilu je spotřeba vzduchu zhruba o 40 % nižší než spotřeba vzduchu bez pulzního ventilu.

Další obrázek ukazuje průběh závislosti výstupního tlaku  $p_3$  na vstupním tlaku  $p_1$ .



Obr. č. 37 – Závislost tlaku  $p_3$  na vstupním tlaku  $p_1$

U závislosti tlaku na výstupu  $p_3$  roste jeho hodnota s růstem tlaku na vstupu  $p_0$ . Oproti průběhu průtoku tady platí nepřímá úměra, a totiž s rostoucími otáčkami na pulzním ventilu dochází ke snížení tlaku na výstupu  $p_3$ . Nejvyšších hodnot tlaku na výstupu bylo dosaženo, když jsem provedl měření bez pulzního ventilu, tedy jen obyčejnou pistol s obyčejnou tryskou. Hodnoty tlaku  $p_3$  se pohybují v rozmezí od 0,018 do 0,034 MPa. Velmi podobných hodnot bylo dosaženo, když byla na pulzním ventilu nastavena 1 a 2 otáčky. Při nastavení tří a čtyř otáček jsou hodnoty výstupního tlaku o něco nižší. U vyšších otáček jsou nižší hodnoty výstupního tlaku proto, protože k pulzaci dochází rychle (krátký čas naplnění ovládací komory a tím rychlé uzavírání a otevírání ventilu), takže výsledný dynamický efekt na výstupu není tak silný. Naopak když je pulzace pomalejší (delší čas naplnění ovládací komory a tím pomalejší uzavírání a otevírání ventilu), pak je dynamický efekt na výstupu silnější. Vstupní tlak má tedy vliv na výstupní tlak, ale velmi malý.

V tabulce č. 1 jsou vidět výsledky pulzního ventilu s obyčejnou tryskou při různých otáčkách.

| Pulzní ventil + obyčejná tryska |     |      |         |        |
|---------------------------------|-----|------|---------|--------|
| 1 otáčka                        |     |      |         |        |
| $p_0$                           | T   | f    | Q       | $p_3$  |
| [MPa]                           | [s] | [Hz] | [l/min] | [MPa]  |
| 0,3                             | 0,3 | 3,3  | 52      | 0,0163 |
| 0,4                             | 0,3 | 3,3  | 65      | 0,0205 |
| 0,5                             | 0,3 | 3,3  | 84      | 0,0265 |
| 0,6                             | 0,3 | 3,3  | 103     | 0,032  |

| Pulzní ventil + obyčejná tryska |       |      |         |        |
|---------------------------------|-------|------|---------|--------|
| 2 otáčky                        |       |      |         |        |
| $p_0$                           | T     | f    | Q       | $p_3$  |
| [MPa]                           | [s]   | [Hz] | [l/min] | [MPa]  |
| 0,3                             | 0,125 | 8,0  | 53      | 0,0153 |
| 0,4                             | 0,136 | 7,4  | 76      | 0,0218 |
| 0,5                             | 0,136 | 7,4  | 95      | 0,0258 |
| 0,6                             | 0,136 | 7,4  | 112     | 0,0303 |

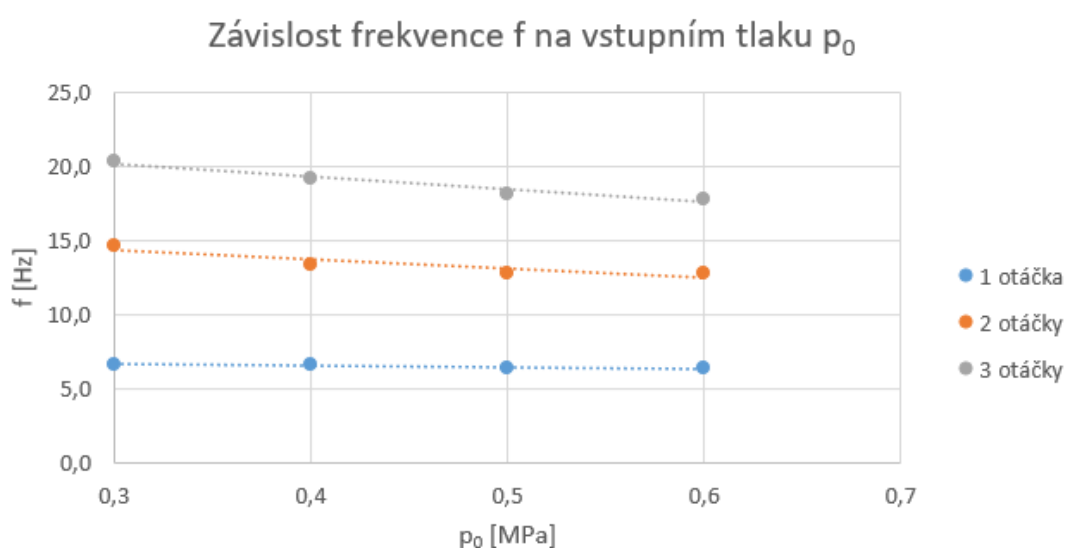
| Pulzní ventil + obyčejná tryska |       |      |         |        |
|---------------------------------|-------|------|---------|--------|
| 3 otáčky                        |       |      |         |        |
| $p_0$                           | T     | f    | Q       | $p_3$  |
| [MPa]                           | [s]   | [Hz] | [l/min] | [MPa]  |
| 0,3                             | 0,075 | 13,3 | 54      | 0,0128 |
| 0,4                             | 0,068 | 14,7 | 81      | 0,0173 |
| 0,5                             |       |      | 89      | 0,0235 |
| 0,6                             |       |      | 112     | 0,0245 |

| Pulzní ventil + obyčejná tryska |     |      |         |        |
|---------------------------------|-----|------|---------|--------|
| 4 otáčky                        |     |      |         |        |
| $p_0$                           | T   | f    | Q       | $p_3$  |
| [MPa]                           | [s] | [Hz] | [l/min] | [MPa]  |
| 0,3                             |     |      | 76      | 0,007  |
| 0,4                             |     |      | 107     | 0,0123 |
| 0,5                             |     |      | 139     | 0,0163 |
| 0,6                             |     |      | 170     | 0,021  |

Tabulka č. 1

### 5.2.5 Měření pulzní pistole Koganei

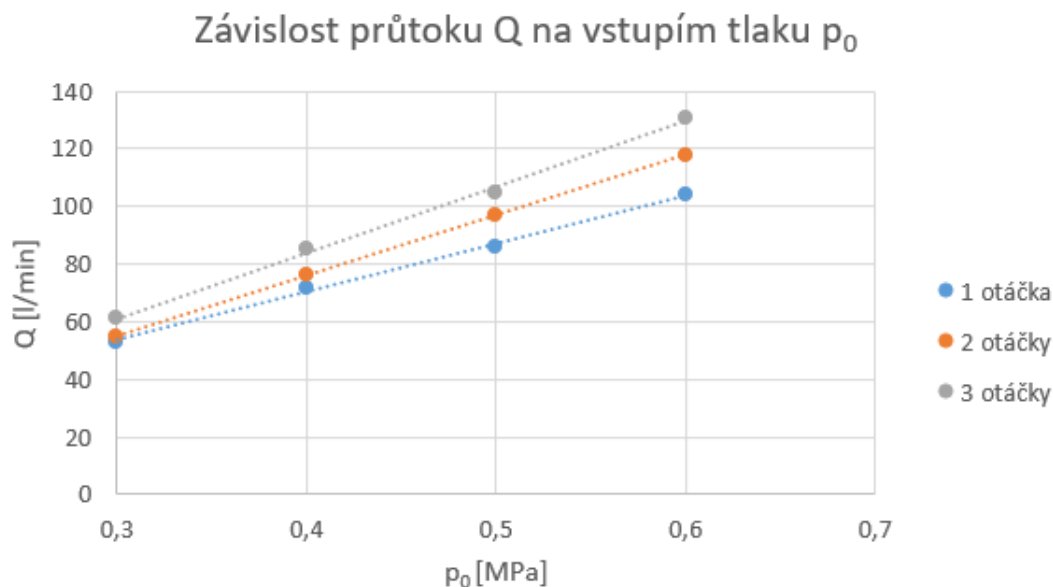
V další části měření jsem do obvodu zapojil pulzní pistoli Koganei s obyčejnou tryskou a odstranil pulzní ventil. Stejně jako u předchozího měření jsem zaznamenával průtok ( $Q$ ), tlak před pulzní pistolí ( $p_1$ ) a tlak na výstupu ( $p_3$ ). Rozdíl oproti předchozímu měření byl v tom, že už nebyl měřen tlak za pulzní pistolí ( $p_2$ ). Všechny tyto měřené veličiny jsem opět porovnával v závislosti na vstupní tlaku ( $p_0$ ). Maximální počet otáček u pulzní pistole je 3.



Obr. č. 38 – Závislost frekvence na vstupním tlaku

Stejně jako u měření pulzního ventilu, tak i u pulzní pistole nemá vstupní tlak vliv na frekvenci při daných otáčkách. Jediný vliv má na frekvenci velikost otáček – s rostoucími otáčkami se opět zvyšuje hodnota frekvence. Vstupní tlak tedy neovlivňuje frekvenci.

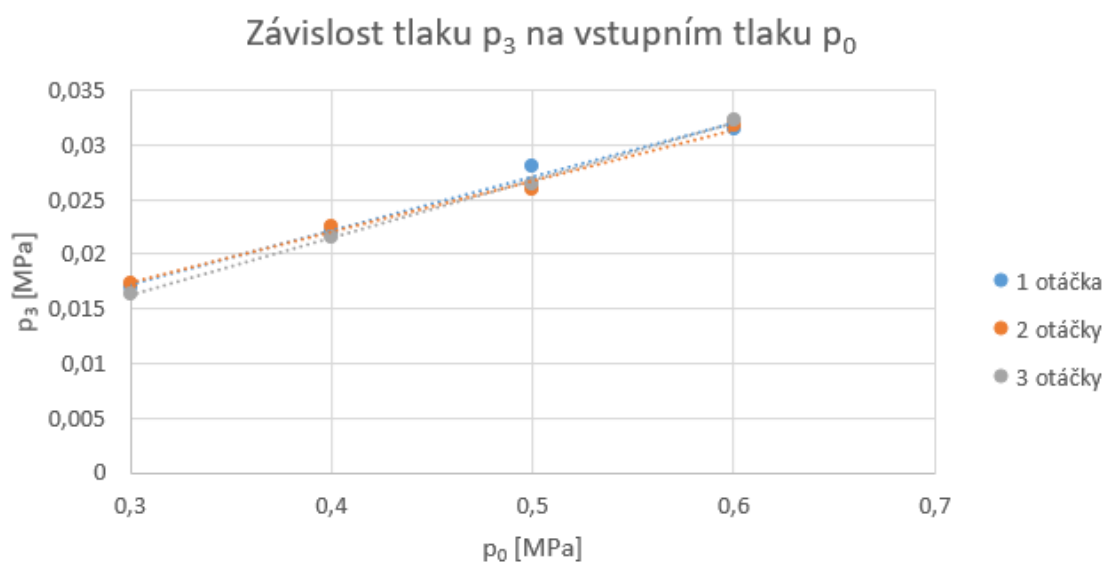
Na dalším obrázku je závislost průtoku na vstupním tlaku.



Obr. č. 39 – Závislost průtoku na vstupním tlaku

Průběh závislosti průtoku na vstupním tlaku je obdobný jako závislost u pulzního ventilu. S rostoucím tlakem roste i průtok. I u této závislosti jsou rozdíly v průtocích při dané otáčce v řádech desítek litrů. Se zvyšujícím se tlakem roste taky rozdíl mezi hodnotami průtoku u jednotlivých otáček. Při tlaku 0,3 MPa je rozdíl mezi 1 a 3 otáčkami zhruba 10 litrů a při tlaku 0,6 MPa už je rozdíl necelých 30 litrů. Platí zde to stejné jako u pulzního ventilu – se zvyšujícími se otáčkami roste spotřeba, jelikož přerušení proudu se zkracuje (pulzace zvyšuje), a tak vzduch proudí častěji.

Poslední veličinou, kterou jsem měřil u pulzní v pistole, byl opět tlak  $p_3$ , jež byl snímám na výstupu z trysky. Z obr. 40 je patrné, že hodnota tlaku  $p_3$  se s rostoucími otáčkami na škrticím ventilu skoro nemění v závislosti na vstupním tlaku  $p_0$ , což u pulzního ventilu bylo naopak a hodnoty tlaku  $p_3$  s rostoucími otáčkami klesaly. Hodnota tlaku  $p_3$  při daných otáčkách roste s hodnotou vstupního tlaku  $p_0$ , ale nárůst je minimální.



Obr. č. 40 – Závislost tlaku  $p_3$  na vstupním tlaku  $p_1$

V tabulce č. 2 jsou výsledky pulzní pistole s obyčejnou tryskou při různých otáčkách.

| Pulzní pistole + obyčejná tryska |       |      |         |        |
|----------------------------------|-------|------|---------|--------|
| 1 otáčka                         |       |      |         |        |
| $p_0$                            | T     | f    | Q       | $p_3$  |
| [MPa]                            | [s]   | [Hz] | [l/min] | [MPa]  |
| 0,3                              | 0,15  | 6,7  | 53      | 0,017  |
| 0,4                              | 0,15  | 6,7  | 72      | 0,022  |
| 0,5                              | 0,157 | 6,4  | 86      | 0,028  |
| 0,6                              | 0,157 | 6,4  | 104     | 0,0315 |

| Pulzní pistole + obyčejná tryska |       |      |         |        |
|----------------------------------|-------|------|---------|--------|
| 2 otáčky                         |       |      |         |        |
| $p_0$                            | T     | f    | Q       | $p_3$  |
| [MPa]                            | [s]   | [Hz] | [l/min] | [MPa]  |
| 0,3                              | 0,068 | 14,7 | 55      | 0,0173 |
| 0,4                              | 0,075 | 13,3 | 76      | 0,0225 |
| 0,5                              | 0,078 | 12,8 | 97      | 0,026  |
| 0,6                              | 0,078 | 12,8 | 118     | 0,0318 |

| Pulzní pistole + obyčejná tryska |       |      |         |        |
|----------------------------------|-------|------|---------|--------|
| 3 otáčky                         |       |      |         |        |
| $p_0$                            | T     | f    | Q       | $p_3$  |
| [MPa]                            | [s]   | [Hz] | [l/min] | [MPa]  |
| 0,3                              | 0,049 | 20,4 | 61      | 0,0163 |
| 0,4                              | 0,052 | 19,2 | 85      | 0,0215 |
| 0,5                              | 0,055 | 18,2 | 105     | 0,0265 |
| 0,6                              | 0,056 | 17,9 | 131     | 0,0323 |

Tabulka č. 2

### 5.3 Realizace a postup měření č. 2

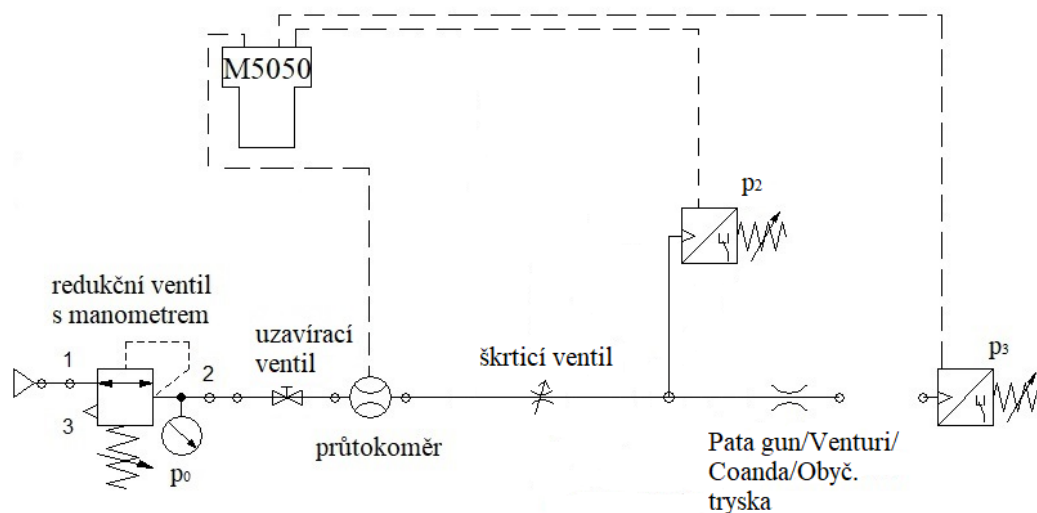
V rámci dalšího měření jsem porovnával závislost dynamického tlaku (tlak  $p_3$  měřený na výstupu z dané trysky) na průtoku. Porovnával jsem obyčejnou trysku, Coanda trysku, Venturiho trysku a rotační trysku Pata gun. Na dalším obrázku jsem použité trysky.



Obr. č. 41 – a) Obyč. tryska, b) Coanda tryska, c) Venturiho tryska, d) Pata gun [20]

Měření probíhalo podobně jako předchozí měření s tím rozdílem, že u tohoto měření jsem nechal nastavený vstupní tlak  $p_0$  na hodnotě 0,5 MPa a měnil jsem průtok pomocí škrticího ventilu. Měřicí obvod byl taky stejný, akorát byl navíc zapojen škrticí ventil, který sloužil k regulaci velikosti průtoku. Postup měření byl takový, že vždy pro danou trysku změřil hodnotu dynamického tlaku při daném průtoku, přičemž průtok jsem nastavoval od hodnoty 100 NI/min a zvyšoval jej s každým dalším krokem o 20 NI/min až do hodnoty 200 NI/min. Výjimkou byla Venturiho tryska, která se nedala měřit při tak velkém průtoku. Takže u této trysky byl dynamický tlak měřen po 10 NI/min od hodnoty průtoku 50 NI/min do hodnoty 100 NI/min. Vzdálenost trysky byla vždy 30 mm od snímače dynamického tlaku.

Na dalším obrázku je schéma zapojení obvodu pro toto měření.



Obr. č. 42 – Schéma zapojení obvodu pro měření trysek

### 5.3.1 Výsledky měření č. 2

Stejně jako u měření, tak i u vyhodnocování výsledků jsem postupoval stejně jako u předchozího měření. Veličiny byly zapisovány pomocí přístroje M5050 a ukládány do programu hydrowin. V programu excel jsem veličiny vyhodnotil v tabulkách, i grafech. Při tomto měření jsem se zaměřil pouze na to, jaká je hodnota dynamického tlaku u různých trysek při stejném průtoku. V tabulce č. 3 jsou výsledky dynamického tlaku jednotlivých trysek.

| Coan. tr., $p = 0,5 \text{ MPa}$ ,<br>$L = 30 \text{ mm}$ |        |
|---|--------|
| Q   | $p_3$  |
| [ $\text{Nl/min}$ ]                                       | [MPa]  |
| 100   | 0,0012 |
| 120   | 0,0020 |
| 140   | 0,0030 |
| 160   | 0,0037 |
| 180   | 0,0050 |
| 200   | 0,0062 |

| Obyč. tr., $p = 0,5 \text{ MPa}$ ,<br>$L = 30 \text{ mm}$ |        |
|---|--------|
| Q   | $p_3$  |
| [ $\text{Nl/min}$ ]                                       | [MPa]  |
| 100   | 0,0115 |
| 120   | 0,0147 |
| 140   | 0,0167 |
| 160   | 0,0195 |
| 180   | 0,0227 |
| 200   | 0,0250 |

| Vent. tr., $p = 0,5 \text{ MPa}$ ,<br>$L = 30 \text{ mm}$ |        |
|---|--------|
| Q   | $p_3$  |
| [ $\text{Nl/min}$ ]                                       | [MPa]  |
| 50  | 0,0050 |
| 60  | 0,0062 |
| 70  | 0,0065 |
| 80  | 0,0075 |
| 90  | 0,0080 |
| 100   | 0,0132 |

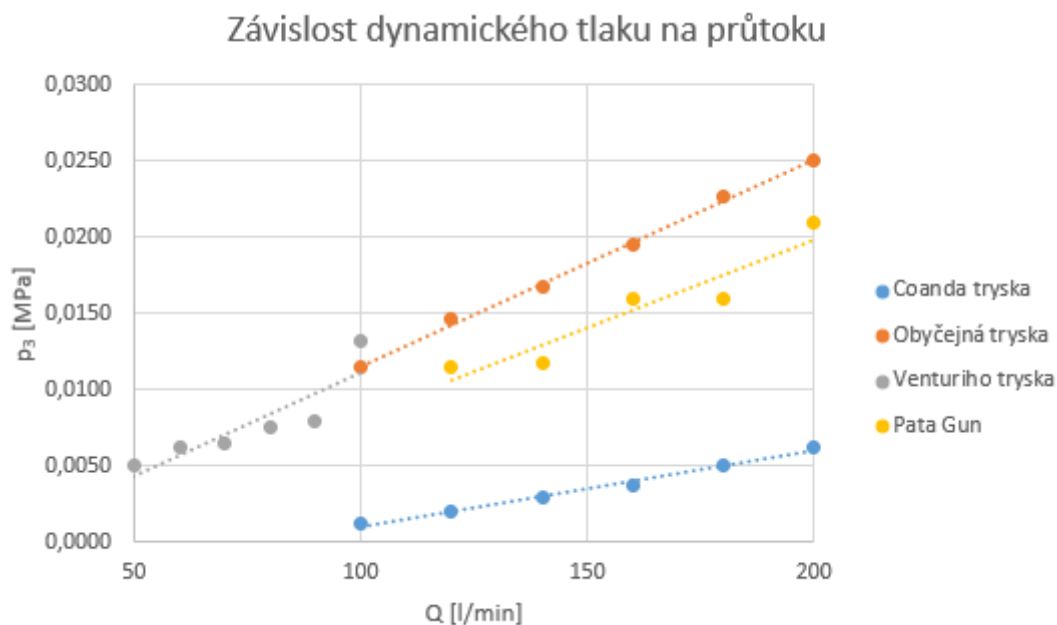


| Pata Gun, $p = 0,5 \text{ MPa}$ ,<br>$L = 30 \text{ mm}$ |        |
|--|--------|
| Q  | $p_3$  |
| [l/min]  | [MPa]  |
| 100  | 0,0003 |
| 120  | 0,0115 |
| 140  | 0,0118 |
| 160  | 0,0160 |
| 180  | 0,0160 |
| 200  | 0,0210 |

| Pata Gun, $p = 0,5 \text{ MPa}$ ,<br>$L = 10 \text{ mm}$ |        |
|--|--------|
| Q  | $p_3$  |
| [l/min]  | [MPa]  |
| 110  | 0,0105 |
| 120  | 0,0115 |
| 140  | 0,0122 |
| 160  | 0,0165 |
| 180  | 0,0198 |
| 200  | 0,0215 |

Tabulka č.3

Všechny trysky byly měřeny ve vzdálenosti 30 mm od snímače tlaku na výstupu. U trysky pat gun jsem provedl taky měření ve vzdálenosti 10 mm, jelikož doporučená vzdálenost, aby byla účinnost co největší, je 10 až 20 mm. Z toho důvodu jsem provedl měření, abych zjistil, jak se změní dynamický tlak, jestliže bude tryska v doporučené vzdálenosti.



Obr. č. 43 – Závislost dynamického tlaku na průtoku u různých trysek

Z obrázku č. 43 je vidět, že největších hodnot dynamického tlaku dosahuje obyčejná tryska, nutno ale zohlednit to, že u Venturiho trysky nebylo možné nastavit průtok vyšší než 100 Nl/min. Je totiž zřejmé, že při průtoku 100 Nl/min je hodnota dynamického tlaku u Venturiho trysky vyšší než u obyčejné trysky. Je tedy pravděpodobné, že jestliže by bylo možné u Venturiho trysky nastavit vyšší průtok, bylo by pak dosaženo vyšších hodnot dynamického tlaku než u obyčejné trysky. Venturiho tryska byla průtokem omezena pravděpodobně z toho důvodu, že průměr otvoru, kudy prochází vzduch, je 1,5 mm. U obyčejné trysky a pata gunu je otvor o něco větší a u Coanda trysky vzduch prochází skrz mezikruží, takže tam je plocha také větší. Rotační tryska pata gun dosahuje o něco nižších hodnot než obyčejná tryska, jen dynamický tlak při 100 Nl/min je nulový, jelikož při tomto průtoku ani nedocházelo k rotaci hadičky. K rotaci docházelo až od 110 Nl/min. Nejnižších hodnot dosahuje Coanda tryska, jejíž maximální hodnota je okolo 0,006 MPa, což odpovídá minimální hodnotě Venturiho trysky, při daleko nižším průtoku. Závislost dynamického tlaku je se s rostoucím tlakem zvyšuje u všech typů trysek.

Výrobce Pata gunu v katalogu uvádí, že ve vzdálenosti 10 mm by měla tryska dosahovat tlaku až 0,2 MPa při vstupním tlaku 0,4 MPa. Takového tlaku jsem při měření nedosáhl, a to jsem prováděl měření při vstupním tlaku 0,5 MPa.

#### 5.4 Realizace a postup měření č. 3 a č. 4

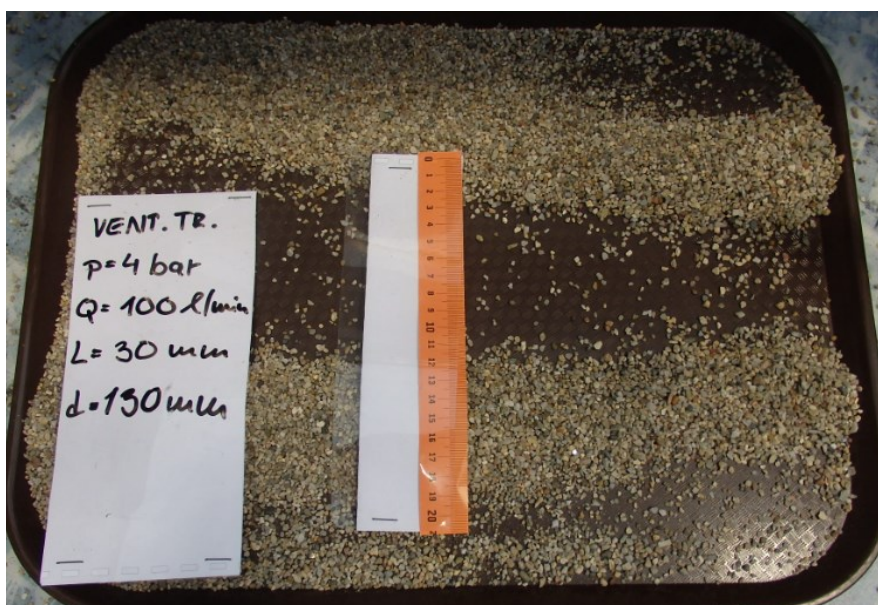
Mimo porovnávání dynamického efektu číselně jsem porovnával i dynamický efekt, který je viditelný. Náplní tohoto měření bylo foukat jednotlivými tryskami s pulzním ventilem a bez pulzního ventilu do materiálu, kde bude vidět rozdíl. Jako materiál jsem zvolil písek, protože jeho konzistence byla ideální pro tyto pokusy. Velikost zrnka písku byla 2-3 mm.

Nejprve jsem provedl měření, kdy jsem zajistil pohyb trysek nad pískem a porovnával, jak širokou mezeru každá tryska do písku vyfoukne. Výška vrstvy byla 3 mm a rychlost cca  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Pohyb jsem zajistil tak, že jsem využil bezpístnicový válec, na který jsem umístil držák, do něž byla umístěna flexibilní hadice s tryskou. Flexibilní hadici jsem použil kvůli její pevnosti, dobrému uchycení do držáku a možnosti snadno měnit výšku trysky od hladiny písku. Na dalším obrázku je fotka z měření.



Obr. č. 44 – Měření šíře vyfoukané mezery

Bezpečnostní válec byl ovládaný monostabilním 5/3 ventilem s mechanickým ovládáním. Vzduch proudící do trysky byl ovládaný bistabilním 3/2 ventilem rovněž s mechanickým ovládáním. Dále byl před trysku zapojen škrticí ventil, pomocí kterého jsem nastavoval průtok. Rovněž byl zapojen průtokoměr a snímač tlaku. Tlak a průtok jsem vyhodnocoval pomocí přístroje M5050, o které jsem psal již v předchozí kapitole. Na dalším obrázku je ukázka, jak bylo vyhodnocováno a dokumentováno měření mezery.



Obr. č. 45 – Dokumentace a vyhodnocení měření č. 3

#### 5.4.1 Výsledky měření č. 3

Samotné měření probíhalo tak, že tryska projela nad pískem, a poté jsem změřil jaká je šíře vyfoukané mezery. Šířku mezery jsem měřil vždy v jednom bodě, a to v polovině tácu. Co se týče podmínek měření, tak tlak byl nastaven na 0,4 MPa, průtok byl nastaven na 110 a 150 NI/min a vzdálenost trysky od písku byla vždy 30 mm. Pulzní ventil byl nastaven na 1 otáčku. Písek byl rovnoměrně rozprostřen na tácu a výška vrstvy písku byla zhruba 4-5 mm. V další tabulce jsou výsledky měření při průtoku 110 a 150 NI/min.

| p= 0,4 MPa, Q= 110 NI/min |        |                | p= 0,4 MPa, Q= 150 NI/min |                         |                |
|---------------------------|--------|----------------|---------------------------|-------------------------|----------------|
|                           | Mezera | Snížený průtok |                           | Mezera                  | Snížený průtok |
|                           | [mm]   | [NI/min]       |                           | [mm]                    | [NI/min]       |
| Obyč. tryska              | 120    |                | Obyč. tryska              | 130                     |                |
| Ob. tr. + PV              | 80     | 70             | Ob. tr. + PV              | 90                      | 70             |
| Ven. tryska               | 130    |                | Ven. tryska               | nelze dosáhnout průtoku |                |
| Ven. tr. + PV             | 100    | 50             | Ven. tr. + PV             | nelze dosáhnout průtoku |                |
| Coan. tr.                 | 50     |                | Coan. tr.                 | 60                      |                |
| Coan. tr. + PV            | 50     | 95             | Coan. tr. + PV            | 55                      | 100            |
| Pata Gun                  | 90     |                | Pata Gun                  | 100                     |                |

Tabulka č. 4

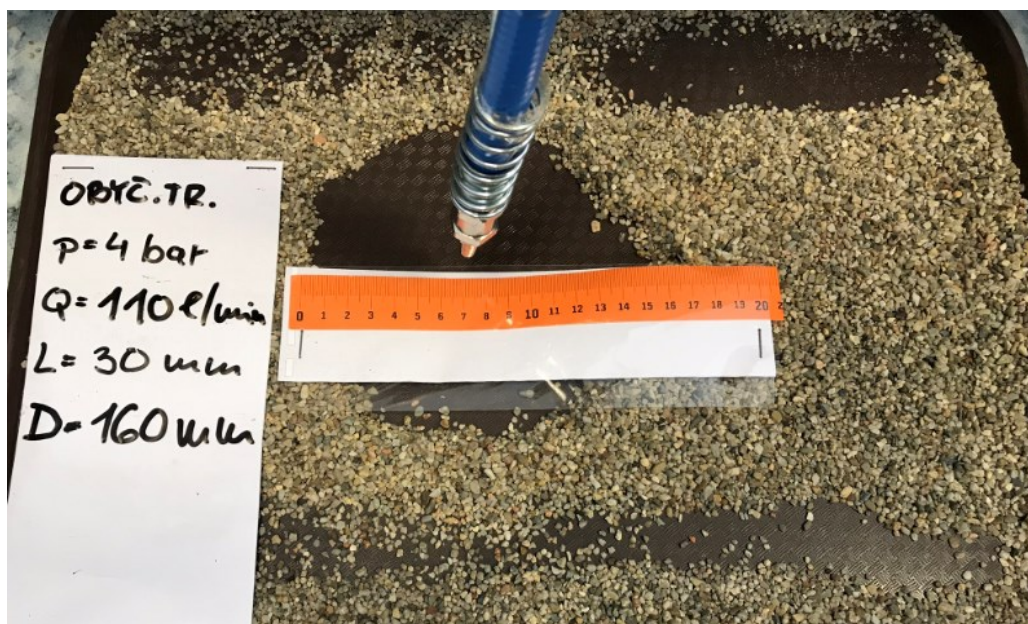
Z výsledků měření je patrné, že při průtoku 150 NI/min byla naměřená mezera u každé trysky o něco větší, ale ten rozdíl není zásadní. Při průtoku 110 NI/min byla nejúčinnější Venturiho tryska, která vyfoukala mezeru širokou 130 mm. Velmi podobně na tom byla obyčejná tryska. Naopak nejmenší mezeru vyfoukala Coanda tryska, a to 50 mm. Všechny trysky byly měřeny bez pulzního ventilu, a také s pulzním ventilem. Nicméně při tomto experimentu neměl pulzní ventil příliš dobrý účinek, jelikož u každé trysky se s pulzním ventilem snížila šíře vyfoukané mezery. Jak už bylo řečeno, tak pro každou trysku byl nastavený průtok na 110 NI/min, a pak na 150 NI/min. V tabulce výsledků měření je sloupec s názvem „snížený průtok“. Tento sloupec jsem do výsledků vložil proto, protože při měření s pulzním ventilem průtok poklesl. Snížená hodnota průtoku při měření s pulzním ventilem má určitě vliv na hodnotu šíře mezery. Při nastaveném průtoku na 150 NI/min nebylo možné měřit Venturiho trysku, jelikož maximální hodnota průtoku byla okolo 120 NI/min. Ale jelikož u všech trysek rostla šíře mezery s průtokem, dá se předpokládat, že Venturiho tryska by dosáhla ještě většího efektu. U tohoto měření by se



dalo říct, že výsledný efekt je lepší bez pulzního ventilu. Nicméně je třeba dodat, že by asi bylo potřeba provést více měření, aby se mé tvrzení potvrdilo, dále hraje určitě roli taky sklon, pod kterým tryska na písek fouká a další věci.

#### 5.4.2 Výsledky měření č. 4

V dalším měření jsem porovnával průměr kruhu, který daná tryska vyfouká do písku. Tentokrát už se nejednalo o měření za pohybu, ale trysku jsem pomocí bezpístnicového válce umístil na prostředek tácu s pískem, a poté jsem foukal po dobu tří sekund. Stejně jako u předchozí měření byl tlak nastaven na 0,4 MPa, průtok byl tentokrát jen 110 l/min a na pulzním ventilu byly nastaveny 2 otáčky. Vzdálenost trysky od vrstvy písku byla rovněž 30 mm. Při tomto měření jsem postupoval naprosto stejně jako u předchozího měření, včetně použití stejných prvků. Na dalším obrázku je opět zobrazen příklad vyhodnocování a dokumentace měření.



Obr. č. 46 – Dokumentace a vyhodnocení měření č. 4

Vyhodnocování vyfoukaného kruhu bylo snazší v porovnání s vyhodnocováním vyfoukané mezery, jelikož určit přesnou šíři mezery nebylo možné. U kruhu to tedy bylo o něco snazší, hlavně proto, že když daná tryska foukala přímo doprostřed, tak poměrně čistě

vyfoukala celou plochu pod ní, kdežto při měření s pohybem nebyl prostor vyfoukané mezery úplně čistý, a tak se obtížně určovala přesná šířka mezery. V tabulce č. 5 jsou výsledky měření vyfoukaného průměru danou tryskou.

| p= 0,4 MPa, Q= 110 NI/min |      |                |
|---------------------------|------|----------------|
|                           | Ø D  | Snížený průtok |
|                           | [mm] | [NI/min]       |
| Obyč. tryska              | 160  |                |
| Ob. tr. + PV              | 180  | 70             |
| Ven. tryska               | 170  |                |
| Ven. tr. + PV             | 160  | 50             |
| Coan. tr.                 | 110  |                |
| Coan. tr. + PV            | 120  | 95             |
| Pata Gun                  | 160  |                |

Tabulka č. 5

Při tomto měření dosáhla nejlepšího efektu obyčejná tryska v kombinaci s pulzním ventilem, ta vyfoukala kruh o průměru zhruba 180 mm. Velmi dobrého efektu dosáhla i obyčejná tryska bez pulzního ventilu, Venturiho tryska s pulzním ventilem a bez něj, a také rotační rázová tryska Pata Gun. Nejmenšího efektu docílila opět Coanda tryska. Jedním z možných důvodů, proč Coanda tryska nemá takový efekt, je to, že vlivem svého tvaru je vzduch proudící z mezikruží soustředěn do bodu, který nezaujímá tak velký rozměr, jako proud vzduchu u obyčejné trysky nebo Venturiho trysky, jejichž průměr je 2 mm a 1,5 mm. Pulzní ventil měl negativní účinek akorát v kombinaci s Venturiho tryskou, s ostatními tryskami měl účinek pozitivní a trysky dosáhly většího vyfoukaného průměru. V případě tohoto měření je naopak lepšího efektu docíleno s pulzním ventilem.

Pokud bych porovnal výsledky jen dynamických ofuků, tedy trysky v kombinaci v pulzním ventilem versus rotační rázová tryska Pata Gun, pak bych řekl, že Pata Gun dosáhl o něco málo lepších výsledků. Samozřejmě by bylo třeba provést rozsáhlejší měření a více různých experimentů při různých podmínkách, aby bylo možné lépe vyhodnotit, který z těchto dynamických ofuků má lepší efekt.

### 5.5 Realizace a postup měření č. 5

Toto měření bylo přizpůsobeno trochu více praktickému použití, jelikož jsem porovnával, jak účinné budou jednotlivé trysky samotné i v kombinaci s pulzním ventilem v případě, že je třeba vyfouknout nečistoty z členitého povrchu. Pro měření jsem použil plastovou mřížku, která byla zasypána pískem a porovnával jsem, kolik mezer v mřížce daná tryska vyfoukne (počet mezer ve svislém směru). V praxi se totiž s tímto problémem setkáváme každý den, kdy je potřeba vyfouknout kapalinu, prach, písek či jiný materiál z problematického místa. Princip měření byl téměř stejný jako u měření č. 3 a 4. Další podmínky byly obdobné, takže tlak byl nastaven na 4 bary, průtok byl 110 l/min a pulzní ventil jsem nastavil na 2 otáčky. Šířka jedné mezery v mřížce byla 9 mm. Na obrázku č. 47 je fotka z měření.



Obr. č. 47 – Dokumentace a vyhodnocení měření č. 5

### 5.5.1 Výsledky měření č. 5

Stejně jako u předchozích měření jsem měřil trysky samostatně i v kombinaci s pulzním ventilem, abych mohl porovnat, je-li výsledný efekt ofuku lepší s pulzním ventilem nebo bez něj. Vyhodnocoval jsem počet vyfoukaných (vyčištěných) mezer v mřížce. Vyfoukané mezery jsem určoval podle toho, kolik mezer ve směru kolmém na pohyb trysky bylo vyfouknuto. Takže když někde byly vyfouknuty čtyři mezery a někde dvě, tak jsem udělal průměr. Tabulka č. 6 zobrazuje výsledky tohoto měření.

| p= 0,4 MPa, Q= 110 NI/min |             |                |
|---------------------------|-------------|----------------|
|                           | Počet mezer | Snížený průtok |
|                           | [-]         | [NI/min]       |
| Obyč. tryska              | 5           |                |
| Ob. tr. + PV              | 3           | 72             |
| Ven. tryska               | 7           |                |
| Ven. tr. + PV             | 5           | 48             |
| Coan. tr.                 | 2           |                |
| Coan. tr. + PV            | 2           | 93             |
| Pata Gun                  | 5           |                |

Tabulka č. 6

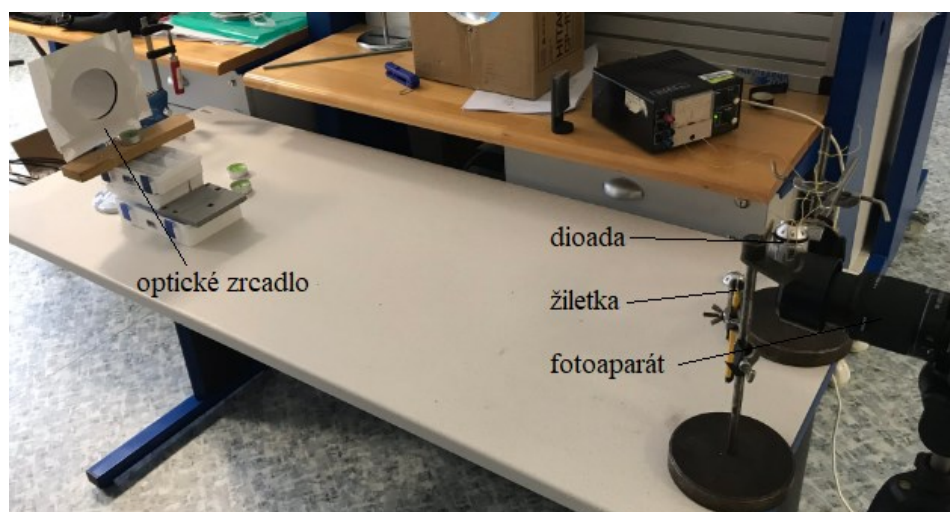
Při tomto měření dopadla nejlépe Venturiho tryska, která dokázala vyfouknout 7 mezer. Jen pro připomenutí – u Venturiho trysky byl opět maximální průtok 110 NI/min, více se nastavit nedalo, ale i přesto dosáhla tryska nejlepších výsledků. U všech trysek měl pulzní ventil spíš negativní efekt, množství vyfouknutých mezer se snížilo. Venturiho tryska s pulzním ventilem však dosáhla takových výsledků, jako obyčejná tryska bez pulzního ventilu nebo jako Pata gun. Nejnížší výsledky měla Coanda tryska, která vyfoukala pouze dvě mezery. Coanda tryska zaujímá nejužší plochu vyfukujícího proudu vzduchu, což je jeden z důvodů, proč nedokázala vyfouknout více mezer. U všech trysek jsem rovněž zaznamenal pokles průtoku, když byl použit pulzní ventil, tato hodnota je v podstatě stejná jako při předchozích měřeních.



## 5.6 Realizace a postup měření č. 6

Posledním experimentem, který jsem chtěl provést, byla vizualizace pomocí dýmu. Z vyvíječe mlhy se však nepodařilo přimíchat mlhu do tlakového vzduchu. To jsem zkoušel ejektorem, ale na výstupu trysek byl velký odpor, a proto se tvořil přetlak i v kanále, kde se tvoří vakuum, pokud je vzduch z ejektoru vypouštěn do atmosféry.

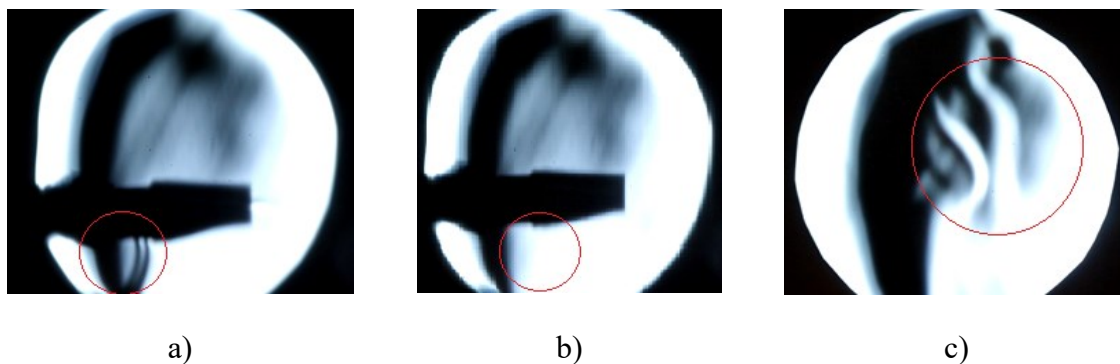
Druhým pokusem byla Schlierenova optika. Tento experiment funguje tak, že zdroj světla (dioda) je odrážený konkávním zrcadlem na okraj žiletky umístěné před kamerou a lámající se světelné paprsky jsou čepelí žiletky zachycovány, díky čemuž vytvářejí jakousi iluzi stínu a dokážeme tak pozorovat například proudění plynů, které v reálném životě bez pomoci techniky pozorovat nemůžeme [29]. Na dalším obrázku je fotka z měření.



Obr. č. 48 – Schlierenova optika

Výsledkem měla být vizualizace proudění jednotlivých trysek, jaký kužel má daná tryska apod., což by šlo vidět právě ve fotoaparátu. Bohužel optické zrcadlo nebylo dostačující, dokonce jsem použil několik různých zrcadel, kdy bylo každé trochu jinak vyduté, i několik různých fotoaparátů, nicméně s těmito dostupnými prostředky se nepodařilo dostatečně zachytit proudění vzduchu z trysek. Proudění vzduchu jako takové nešlo zaznamenat vůbec, a tak jsem se jej pokusil zachytit pomocí svíčky. Zapálená svíčka postavená zhruba 10 mm po zrcadle a asi 50 mm před zrcadlem vydávala neviditelné proudění spalin, které šlo ve fotoaparátu vidět nejlépe, a tak jsem se pokoušel tryskou foukat do proudění vycházejícího ze svíčky, ale bohužel i tak bylo proudění vidět jen

malinko. Na obrázku a) je záznam z měření, kde je zachyceno přisávání spalin do trysky, na b) bez přisávání a na obrázku c) je pouze proudění svíčky.



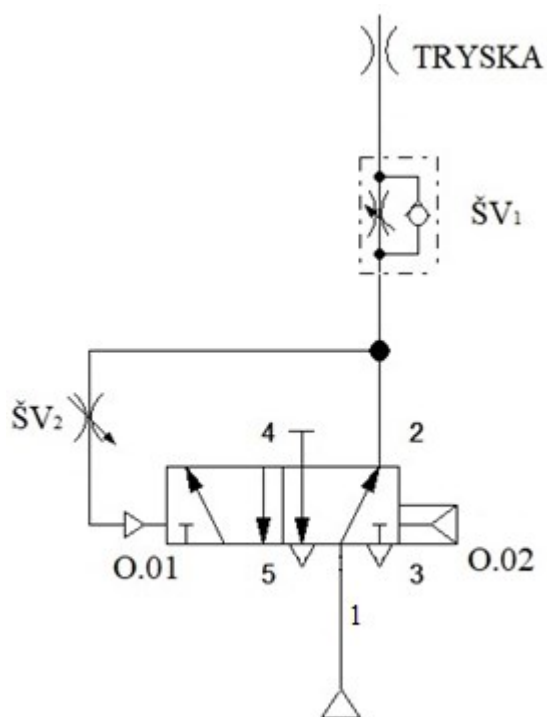
Obr. č. 49 – a) přisávání, b) bez přisávání, c) svíčka

Na obrázku č. 49a) byla pro pokus použita Venturiho tryska. Není moc vidět výstupní proud z trysky, je ale vidět, jak si tryska zespod přisává spaliny ze svíčky.

## 6. Alternativní řešení pulzního ventilu

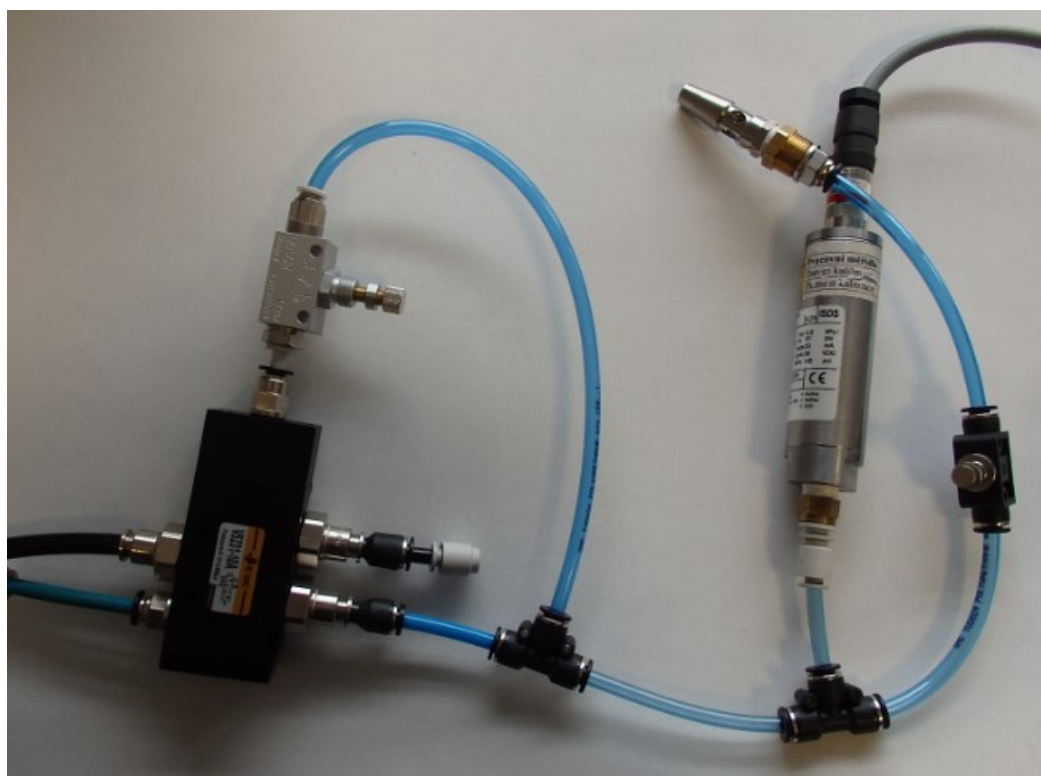
Posledním bodem mojí diplomové práce je navrhnout alternativní řešení pulzního ventilu, respektive navrhnout, jak zajistit pulzující proud. Je samozřejmě možné sestavit pneumatický obvod z více ventilů, kde bude ovládat jeden druhý a bude tak docházet k pulzaci. Já jsem se však snažil navrhnout tento obvod tak, abych použil co nejméně prvků, s čímž souvisí i náklady, a také aby obvod nebyl rozsáhlý z hlediska místa.

Jako základní prvek jsem použil monostabilní 5/2 ventil, ovládaný pneumaticky a pneumatickou pružinou v kombinaci s mechanickou pružinou. Z tohoto ventilu jsem odstranil mechanickou pružinu, abych snížil hodnotu tlaku potřebnou k přestavění ventilu a docházelo tak k pulzaci. K přestavění ventilu bylo třeba alespoň 0,15 MPa a odstraněním mechanické pružiny se tato hodnota snížila. Na dalším obrázku je vidět schéma navrženého řešení pulzace.



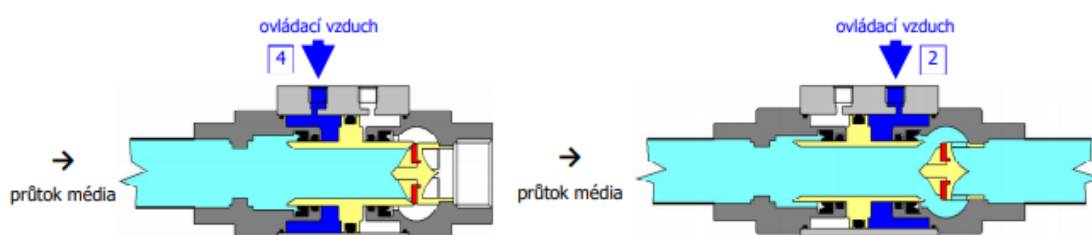
Obr. č. 50 – Alternativní řešení pulzního ventilu

Použil jsem dva škrticí ventily, škrticí ventil ŠV<sub>1</sub> slouží k regulaci velikosti průtoku na výstupu a škrticí ventil ŠV<sub>2</sub> slouží k regulaci frekvence pulzace. Princip funkčnosti je takový, že je-li ventil v poloze 12, tedy je propojena cesta 1 a 2, pak vzduch proudí přes trysku, přičemž je pomocí ŠV<sub>2</sub> regulována rychlost, za jakou dojde k přestavění ventilu do druhé polohy. Jakmile naroste tlak na ovládání O.01, pak dojde k přestavění a propojí se cesta 1 a 4, tedy poloha 14. Vzduch nebude proudit na výstup, jelikož je cesta 4 zaslepená. Na ovládání O.01 už není tlak, jelikož došlo k odvzdušnění propojením cest 2 a 3, a tak stačí malá hodnota tlaku (síla) na ovládání O.02 k přestavění ventilu do polohy 12. Vzduch se na ovládání O.02 dostane skrz vrtaný otvor z kanálu 1 – vstupní tlak. U ovládání O.01 a O.02 se jedná o sílu, jelikož tlak působí na plochu. Dále se pak celý proces opakuje a dochází k pulzaci. Problém nastal tehdy, jestliže na ŠV1 byl nastaven velký průtok, tak po nějakém čase nedocházelo k pulzaci, protože na ŠV1 byl kladen malý odpor, a tak na ovládání O.01 nebyla dostatečná síla pro přestavění. Na dalším obrázku je fotka reálného zapojení alternativního obvodu.



Obr. č. 51 – Foto alternativního řešení

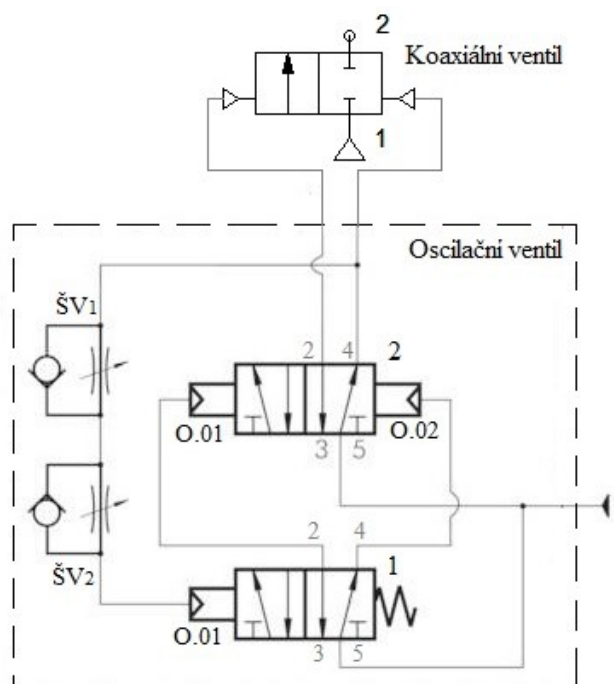
Cena takového sestavené obvodu vyjde zhruba na 1100 Kč, v případě, že by byl použit 3/2 ventil, tak cena ještě klesne na 750 Kč, obě tyto ceny jsou v porovnání s pulzním ventilem mnohem nižší, jelikož cena pulzního ventilu Koganei je okolo 5000 Kč, takže velká výhoda alternativního řešení je určitě cena. Výhoda pulzního ventilu Koganei je v jeho rozměrech, je možné jej kdykoliv zapojit do obvodu před pistolí nebo méně náročné aplikace. S navrženým obvodem by to samozřejmě šlo také, ale z hlediska jeho rozměrů by to bylo komplikovanější na manipulaci. Další výhodou alternativního obvodu je průtok, jelikož pulzní ventil Koganei je malého rozměru, a tak nepropustí tak velké množství vzduchu jako sestavený obvod. Praktické srovnání může být takové, že jestliže bychom chtěli například docílit pulzů u přímého vzduchového nože o délce 500 mm, pak by ventil Koganei z hlediska průtoku stačil. V takovém případě by spíše vyhovoval navržený obvod. Dalším možným řešením, jak docílit pulzace u náročnějších aplikací, by bylo použít například pneumaticky ovládaný koaxiální ventil (bistabilní), který by byl ovládaný oscilačním ventilem, o kterém jsem ve své práci psal. Na dalším obrázku je koaxiální ventil v řezu, kde je vidět, jak tento ventil funguje.



Obr. č. 51 – Koaxiální ventil [28]

Z obrázku je vidět, že pomocí ovládacího vzduchu je koaxiální ventil otevírán a zavírán. V rámci svého zaměstnání jsem narazil na aplikaci, kde je vyráběna textilie ze skelných vláken, která jsou k sobě lepena lepidlem a je potřeba vyfouknout lepidlo ze mřížky, která vznikne mezi vlákny. Pro vyfukování byl aplikován vzduchový nůž přímý délky 700 mm s tloušťkou štěrby 0,08 mm. Těmto parametrům odpovídá spotřeba kolem 2000 NI/min při tlaku 0,5 MPa. Souvislý proud vzduchu však nebyl zcela dostačující, a proto bylo navrženo, že se nůž zkusí doplnit o pulzní zařízení. Parametry pulzního ventilu Koganei by nevyhovovaly, a tak byl aplikován právě koaxiální ventil, který je ovládán ventilem

oscilačním. Koaxiální ventil je bistabilní 2/2 ventil, ovládaný vzduchem. Oscilační ventil je bistabilní 5/2 ventil, jež byl popsán v dřívější kapitole. Oscilační ventil střídavými pulzy do obou větví zajišťuje přestavování koaxiálního ventilu z jedné polohy do druhé a zpět a tím dochází k pulzaci. Při procesu je třeba nastavit správnou frekvenci pulzů. V současné době nemohu říct, zda tato pulzace měla lepší efekt, jelikož se stále testuje. Na dalším obrázku je schéma zapojení oscilačního ventilu a koaxiálního ventilu pro tuto aplikaci.



Obr. č. 52 – Schéma zapojení oscilačního a koaxiálního ventilu

Otázkou je také životnost obou variant. Obě varianty obsahují pohyblivé části. Co se týče alternativního řešení, tak to obsahuje pohyblivou část (šoupátko ventilu), která má omezenou životnost a časem dojde k jeho opotřebení, takže nemusí správně plnit svou funkci. V Koganei ventilu jsou rovněž pohyblivé části, u kterých může dojít k opotřebení.

## 7. Závěr

Cílem mé práce bylo zaměřit se na problematiku týkající se čištění a sušení výrobků pomocí vysokotlakých trysek a nožů. V úvodní části jsem vybral různé typy trysek a nožů, popsal jejich výhody, vlastnosti a použití. Použití nožů a trysek bylo popsáno reálnými příklady z praxe.

Další část práce pojednávala o dynamickém čištění, o možnostech, jak zajistit dynamiku ofuku. Možnosti jsou v podstatě dvě, a to bude pulzující průtok nebo rotační trysky. Jako rotační tryska byla například popsána rotační rázová tryska Pata gun, která funguje na principu rotace hadičky kolem tubusu a tím vytváří dynamický efekt. Uvedl jsem několik typů pulzních ventilů, které se používají v kombinaci právě s uvedenými tryskami. Pulzní ventily fungují na principu přerušování elektrického signálu, anebo může k přerušování docházet pomocí pneumatického ovládání. Mezi pneumaticky ovládané pulzní ventil patří ventil Koganei, který byl také použit pro experimentální měření. Byly popsány principy funkčnosti rotačních trysek i pulzních ventilů.

V praktické části jsem experimentálně porovnával jednotlivé trysky samostatně i v kombinaci s pulzním ventilem. Provedl jsem několik různých měření, kde jsem sledoval účinnost trysek. Porovnával jsem například dynamický tlak na výstupu z trysek při různém průtoku, kde nejlepších výsledků dosáhla obyčejná tryska a Pata gun. Dále jsem měřil šířku vyfoukané mezery do písku, průměr kruhu vyfoukaný do písku a počet vyfoukaných mezer z mřížky zaplněné pískem. Při každém měření byla účinnější jiná tryska, při vyfukování mezer to byla Venturiho tryska a největší průměr vyfoukla obyčejná tryska v kombinaci s pulzním ventilem. Většinou byly trysky účinnější bez pulzního ventilu, ale jejich účinnost nebyla o tolik vyšší jako s pulzním ventilem a nutno dodat, že v kombinaci s pulzním ventilem byla nižší spotřeba. Použití trysky záleží na daném problému a každá tryska je účinnější na jinou aplikaci. Posledním experimentem, který se příliš nevydařil z důvodu nedostatečné optiky, byla vizualizace. Snažil jsem se pomocí Schlierenovy optiky promítnout proudění z trysek, nicméně toto proudění se nepodařilo zcela zachytit.

V poslední části jsem navrhl alternativní řešení pulzního proudu. Z běžných pneumatických prvků jsem sestavil obvod, který zajišťuje pulzaci. Pomocí dvou škrticích ventilů je možné nastavit velikost průtoku a rychlost frekvence. Navržené alternativní řešení jsem porovnal s pulzním ventilem, porovnal jsem životnost obou řešení, finanční náročnost i praktické použití.

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu práce Ing. Lukáši Dvořákovi, Ph.D. za odborné vedení, věnovaný čas a cenné rady, které byly nezbytnými podklady při vypracování mé diplomové práce.



## 8. Použité zdroje

- [1] ČEA, *Stlačený vzduch – snižování energetické náročnosti*. Dostupné z URL:  
<<https://www.mpo-efekt.cz/dokument/2179.pdf>> [cit. 2019-13-3].
- [2] Hennlich, *Jak to funguje*. Dostupné z URL:  
<<https://www.hennlich.cz/produkty/trysky-vzduchove-noze-jak-to-funguje-8230.html>>  
[cit. 2019-13-3]
- [3] SMC, *Air Amplifier Series ZH-X185*. Dostupné z URL:  
<[https://content2.smcetech.com/pdf/ZH-X185\\_EU.pdf](https://content2.smcetech.com/pdf/ZH-X185_EU.pdf)> [cit. 2019-13-3].
- [4] MOS technik, *Vzduchové nože MOS*. Dostupné z URL:  
<<https://www.mos-pneumatics.cz/produkty/vzduchove-noze-mos/sortiment-nozu/vnp/>>  
[cit. 2019-13-3].
- [5] MOS technik, *Sortiment nožů MOS*. Dostupné z URL:  
<<https://www.mos-pneumatics.cz/produkty/vzduchove-noze-mos/sortiment-nozu/>> [cit. 2019-13-3]
- [6] MOS technik, *Vzduchové nože MOS*. Dostupné z URL:  
<<https://www.mos-pneumatics.cz/produkty/vzduchove-noze-mos/sortiment-nozu/vncj/>>  
[cit. 2019-13-3].
- [7] MOS technik, *Vzduchové nože MOS*. Dostupné z URL:  
<<https://www.mos-pneumatics.cz/produkty/vzduchove-noze-mos/sortiment-nozu/vncd/>>  
[cit. 2019-13-13].
- [8] MOS technik, *Vzduchové nože MOS*. Dostupné z URL:  
<<https://www.mos-pneumatics.cz/reference/plzensky-prazdroj-a-s/>> [cit. 2019-13-3].
- [9] MOS technik, *Stlačený vzduch jako nástroj pro efektivní ofukování*. Dostupné z URL:  
<<https://www.mos-pneumatics.cz/>> [cit. 2019-13-3].
- [10] Flockování, *Technologie*. Dostupné z URL:  
<<https://www.flockovani.com/216/technologie/>> [cit. 2019-13-3].
- [11] Parker, *Air Savers*. Dostupné z URL:

<<https://www.hoseandfittingsetc.com/video/parker-air-savers-overview>> [cit. 2019-13-3].

[12] Parker, *Air Saver Unit*. Dostupné z URL:

<<https://www.parker.com/literature/Pneumatics%20Division/0698P%20Air%20Saver%20Catalog.pdf>> [cit. 2019-13-3].

[13] Parker, *Pulse Valves*. Dostupné z URL:

<<http://www.parker.com/Literature/Precision%20Fluidics/Miniature%20Solenoid%20Valves/PulseValves.pdf>> [cit. 2019-13-3].

[14] First Sensor, *High-performance media resistant solenoid valves*. Dostupné z URL:

<[https://www.first-sensor.com/cms/upload/datasheets/DS\\_Standard-Series-9-Pulse-Valves\\_E\\_11275.pdf](https://www.first-sensor.com/cms/upload/datasheets/DS_Standard-Series-9-Pulse-Valves_E_11275.pdf)> [cit. 2019-13-3].

[15] Festo, *Pulzní ventily VZWE*, elektricky řízené. Dostupné z URL:

<[https://www.festo.com/cat/en-gb\\_gb/data/doc\\_CS/PDF/CZ/VZWE\\_CZ.PDF](https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_CS/PDF/CZ/VZWE_CZ.PDF)> [cit. 2019-13-3].

[16] KOGANEI, *Pulse blow air gun*. Dostupné z URL:

<[https://official.en.koganei.co.jp/product/PAG\\_ALL](https://official.en.koganei.co.jp/product/PAG_ALL)> [cit. 2019-13-3].

[17] MOS technik, *2/2 cestná oscilační ventil*. Dostupné z URL:

<<https://shop.mosttechnik.cz/data.aspx?data=c954cbf9-0c10-44f4-9388-cc4dc8a50b98>> [cit. 2019-14-4].

[18] MOS technik, *5/2 cestný oscilační ventil*. Dostupné z URL:

<<https://shop.mosttechnik.cz/data.aspx?data=07bd3e28-a174-406b-9e5c-73a7210b77b2>> [cit. 2019-13-3].

[19] Fluid technik, *Zvláštní ventily G1/8 a G1/4*. Dostupné z URL:

<[http://www.fluidtechnik.eu/resources/upload/data/225\\_A4P026CZ\\_97-110.pdf](http://www.fluidtechnik.eu/resources/upload/data/225_A4P026CZ_97-110.pdf)> [cit. 2019-13-3].

[20] MOS technik, *Rotační rázová tryska*. Dostupné z URL:

<<https://shop.mosttechnik.cz/katalog/komponenty-pro-ofukovani-stlacenym-vzduchem/rotacni-razove-trysky/serie-rrt-tryska-rotacni-material-telesa-pom.aspx>> [cit. 2019-13-3].

- [21] MOS technik, *Vzduchový nůž rotační rázový*. Dostupné z URL:  
<<https://shop.mosttechnik.cz/data.aspx?data=4dcd9335-a00b-4b3f-8bde-27e83929c450>>  
[cit. 2019-13-3].
- [22] MOS technik, *Rotační tryska*. Dostupné z URL:  
<<https://shop.mosttechnik.cz/data.aspx?data=3b9c6a56-9bc8-4335-97c6-4a52adc51999>>  
[cit. 2019-13-3].
- [23] Lontech, *Rotační čistící trysky firmy IMM*. Dostupné z URL:  
<<https://www.lontech.cz/files/imm/rotacni-trysky-imm-specifikace.pdf>> [cit. 2019-13-3].
- [24] Lontech, *Osávací hlavice s rotačními tryskami a eliminací statické elektřiny*.  
Dostupné z URL:  
<<https://www.lontech.cz/files/imm/odsavaci-hlavice-s-rotacnimi-tryskami-imm-specifikace.pdf>> [cit. 2019-13-3].
- [25] ifm, *měřicí systémy průtoků*. Dostupné z URL:  
<<https://www.ifm.com/cz/cs/product/SD6000>> [cit. 2019-4-5].
- [26] Hydrotechnik, *Sensors instruments*. Dostupné z URL: <[http://www.zhongye-test.com/hydratechnik-products/hydratechnik\\_PR310.html](http://www.zhongye-test.com/hydratechnik-products/hydratechnik_PR310.html)> [cit. 2019-4-5].
- [27] Hydrotechnik, *Multi – Systém 5050*. Dostupné z URL:  
<[http://www.hydrotechnik.com/fileadmin/user\\_upload/Manuals/Messtechnik\\_MultiSystem\\_5050\\_BAL\\_ENG.pdf](http://www.hydrotechnik.com/fileadmin/user_upload/Manuals/Messtechnik_MultiSystem_5050_BAL_ENG.pdf)> [cit. 2019-4-5].
- [28] MOS technik, *Pneumaticky ovládané koaxiální ventily*. Dostupné z URL:  
<<https://shop.mosttechnik.cz/data.aspx?data=d2697f2a-966e-4062-887b-23af6fb944de>>  
[cit. 2019-14-5].
- [29] Refresher, *Fascinující Schlierenova optika, pomocou ktorej môžeš pozorovať prúdenie plynov!* Dostupné z URL:  
<<https://refresher.cz/23289-Fascinujuca-Schlierenova-optika-pomocou-ktorej-mozes-pozorovat-prudenie-plynov?gdpr-accept=1>> [cit. 2019-16-5].
- [30] MOS technik, *Pneumatické trysky „nejen“ pro ofukovací pistole*. Dostupné z URL:  
<<https://shop.mosttechnik.cz/katalog/komponenty-pro-ofukovani-stlacenym-vzduchem/pneumaticke-trysky-nejen-pro-ofukovaci-pistole.aspx>> [cit. 2019-17-5].

